



# СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

4(56) ' 2019

Заснований  
у 2007 році

Наукове періодичне видання,  
в якому відображені результати  
наукових досліджень з розробки та  
удосконалення систем управління,  
навігації та зв'язку у різних  
проблемних галузях.

**Засновник:**  
Полтавський національний технічний  
університет імені Юрія Кондратюка

**Адреса редакційної колегії:**  
Україна, 36011, м. Полтава,  
Першотравневий проспект, 24

**Телефон:** +38 (066) 706-18-30  
(консультації, прийом статей).

**E-mail:**  
kozelnkova@ukr.net

**Інформаційний сайт:**  
<http://www.pntu.edu.ua>

**Реферативна інформація**  
зберігається: у загальнодержавній  
реферативній базі даних  
„Україніка наукова” та публікується  
у відповідних тематичних серіях  
УРЖ „Джерело”.

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

### Голова:

КОЗЕЛКОВ Сергій Вікторович (д-р техн. наук, проф., Україна)

### Заступники голови:

ШЕФЕР Олександр Віталійович (д-р техн. наук, доц., Україна)

ШУЛЬГА Олександр Васильович (д-р техн. наук, доц., Україна)

### Члени:

БЛАУНШТЕЙН Натан Олександрович (д-р техн. наук, проф., Ізраїль)

ВЕСОЛОВСЬКИЙ Кшиштоф (д-р техн. наук, проф., Польща)

ГЛИВА Валентин Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КОРОБКО Богдан Олегович (д-р техн. наук, доц., Україна)

КОШОВИЙ Микола Дмитрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КРАСНОБАЄВ Віктор Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КУЧУК Георгій Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЛАДАНЮК Анатолій Петрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЛУНТОВСЬКИЙ Андрій Олегович (д-р техн. наук, проф., Німеччина)

МАШКОВ Віктор Альбертович (д-р техн. наук, проф., Чехія)

МАШКОВ Олег Альбертович (д-р техн. наук, проф., Україна)

МОРГУН Олександр Андрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ПОПОВ Валентин Іванович (д-р фіз.мат. наук, проф., Латвія)

СТАНКУНАС Йонас (д-р техн. наук, проф., Литва)

СТАСЄВ Юрій Володимирович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ФРОЛОВ Євгеній Андрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ХОРОШКО Володимир Олексійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЧОРНИЙ Олексій Петрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ШЛОМЧАК Георгій Григорович (д-р техн. наук, проф., Україна)

### Відповідальний секретар:

КОЗЕЛКОВА Катерина Сергіївна (д-р техн. наук, проф., Україна)

*За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор*

*Журнал індексується міжнародними бібліометричними та наукометричними базами даних: Index Copernicus (Польща), General Impact Factor (ЄС), Google Scholar (США), Academic Resource Index (ЄС), Scientific Indexed Service (США).*

*Затверджений до друку вченою радою Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка (протокол від 11 вересня 2019 року № 1)*

*Занесений до “Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук” (технічні науки) (від дати включення наказом Міністерства освіти і науки України) від 24.10.2017 № 1413 (додаток 7, п. 31)*

*Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.*

# З М І С Т

## КОНТРОЛЬ КОСМІЧНОГО ТА ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

<i>Павленко М. А., Петрушенко М. М., Шило С. Г., Борозенець І. О., Дмитрієв О. М.</i> Метод проектування та синтезу інформаційних моделей для оцінки обстановки в автоматизованих системах управління повітряним рухом .....	3
<i>Федоров А. В., Худов Г. В., Бакуменко Б. В., Тахьян К. А., Ковалевський С. М.</i> Метод синхронізації системи приймачів ADS-B при веденні радіолокаційного контролю повітряної обстановки з використанням технології MLAT .....	9

## УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Кононов В. Б., Кононова О. А., Соломіна Н. В.</i> Дослідження залежності коефіцієнту акустичного відображення від довжини кабелю при розімкненому і зімкненому стані приладів ідентифікації об'єктів .....	13
<i>Леві Л. І.</i> Оптимізація енергетичних затрат і витрат води в автоматизованій системі керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур .....	17
<i>Макогон О. А., Васиденко Д. В., Базилевський І. С., Ткаченко М. Д., Онопрієнко О. С., Волобуєв Р. В.</i> Використання математичного апарату алгебри логіки для розроблення автоматизованої системи передпускового контролю двигунів внутрішнього згоряння .....	21

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Барковська О. Ю., Пивоварова Д. І., Сердечний В. С., Ляшова А. О.</i> Прискорений алгоритм пошуку слів-образів у тексті з адаптивною декомпозицією вихідних даних .....	28
<i>Navyrylyshyn A., Dmytrenko T., Derkach T., Dmytrenko A.</i> Development of informational system for the electronic educational and methodical complex of the discipline .....	35
<i>Naftiak A., Shefer O., Borodina E., Alyoshin S.</i> Formation of professional competence of future IT specialists in institutions of higher education .....	40
<i>Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Пономаренко Р. П.</i> Логічний аналіз та оброблення даних задля класифікації зображень на підставі формування статистичного центру опису .....	43
<i>Данілов Ю. О., Стадник В. В.</i> Моделювання процесу функціонування штучного зсуву повітряних мас в атмосфері .....	49
<i>Кучук Н. Г.</i> Метод розрахунку максимальних інтенсивностей інформаційних потоків у гіперконвергентній системі .....	53
<i>Лебеденко Т. М., Голоवेशко М. В., Холодкова А. В.</i> Дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж .....	57
<i>Лемешко О. В., Шаповалова А. С., Єременко О. С., Євдокименко М. О., Хайлан А. М.</i> Математична модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження та диференційованого обмеження трафіка в мережах SD-WAN .....	63
<i>Маковейчук О. М., Рубан І. В., Худов Г. В.</i> Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок .....	72
<i>Milov O., Korol O., Khvostenko V.</i> Development of the classification of the cyber security agents bounded rationality ....	82
<i>Morozova O. I.</i> Basics for the formalization of educational and production processes .....	87
<i>Паценко О. М.</i> Оцінювання невизначеності вимірювання твердості металів методом Брінелля .....	91
<i>Федотова-Півень І. М., Лада Н. В., Канашиевич Г. В., Пустовіт М. О.</i> Технологія побудови двохоперандної чотирьохрозрядної операції мінімальної складності для строгого стійкого криптографічного кодування .....	95
<i>Харченко В. С., Певнев В. Я.</i> Технологія побудови паралельних алгоритмів факторизації .....	100
<i>Чалий С. Ф., Лецинський В. О., Лецинська І. О.</i> Доповнення вхідних даних рекомендаційної системи в ситуації циклічного холодного старту з використанням темпоральних обмежень типу «Next» .....	105
<i>Шингалов Д. В., Мелешко Є. В., Босько В. В.</i> Дослідження відкритих наборів даних веб-ресурсів у контексті застосування їх для тестування рекомендаційних систем .....	110
<i>Шитова Т. М., Зубрицький Г. М., Кірвас В. В.</i> Метод формування еталонного зображення яскравого об'єкту.....	114

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Багрій М. М.</i> Розроблення та дослідження екрануючих властивостей спецодягу для захисту від електромагнітних впливів .....	118
<i>Глива В. А., Тихенко О. М., Ходаковський О. В.</i> Методологія проектування неоднорідних електромагнітних екранів .....	122

## ЗВ'ЯЗОК ТА РАДІОЛОКАЦІЯ

<i>Василишин В. І., Луняка В. Д., Коцюба В. П.</i> Спектральний аналіз методом ESPRIT з використанням оцінки тепліцевої кореляційної матриці .....	126
<i>Карлов В. Д., Кузнєцов О. Л., Артеменко А. М., Карлов А. Д.</i> Зниження точності вимірювання частоти пачки радіоімпульсів внаслідок впливу умов її поширення і відбиття .....	130
<i>Мусієнко А. П., Лантєв О. А., Собчук В. В., Борсук Б. М.</i> Методика вибору оптимального вхідного сигналу радіомоніторингу для програмних засобів на базі перетворення Фур'є .....	135
<i>Почерняєв В. М., Зайченко В. В.</i> Боротьба з міжсимвольною інтерференцією за допомогою еквалайзерів і ортогонального часового мультиплексування .....	141

<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	146
----------------------------------	-----

# Контроль космічного та повітряного простору

УДК 623.765:681.513.6

doi: 10.26906/SUNZ.2019.4.003

М. А. Павленко<sup>1</sup>, М. М. Петрушенко<sup>2</sup>, С. Г. Шило<sup>1</sup>, І. О. Борозенець<sup>1</sup>, О. М. Дмитрієв<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup> Військова академія, Одеса, Україна

<sup>3</sup> Льотна академія національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

## МЕТОД ПРОЕКТУВАННЯ ТА СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ ОБСТАНОВКИ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

В статті викладено результати досліджень, присвячені питанням проектування та синтезу інформаційних моделей, що є необхідною складовою системи інформаційного забезпечення осіб, які приймають рішення в автоматизованих системах управління повітряним рухом. Наведено аналіз можливих структур побудови інформаційних моделей та запропоновано для порівняно простих умов обстановки використовувати лінійну або ієрархічну структури. Для врахування можливих змін ситуації обстановки, що призводять до необхідності суттєвого зростання обсягу інформації для відображення, доцільно використовувати комбіновану структуру інформаційної моделі. Наведено співвідношення, які надають можливість оцінити характеристики структури інформаційних моделей на етапі їх ергономічного проектування і визначити кількість інформаційних елементів в одній програмі відображення з урахуванням мінімізації часу пошуку заданих елементів. Наведено можливі варіанти спільного використання засобів відображення інформації як індивідуального так і групового та колективного користування. Запропоновано структуру процесу та послідовність і зміст операцій при розробці вимог до форми інформаційних елементів. Наводяться дослідження ефективності використання різних форм подання інформаційних елементів. В підсумку наводяться структура, зміст та послідовність етапів методу проектування і синтезу інформаційних моделей для інформаційної підтримки прийняття рішень з оцінки обстановки, який на відміну від існуючих враховує етапи діяльності та специфіку задач, що вирішуються операторами в автоматизованих системах управління повітряним рухом.

**Ключові слова:** ситуація обстановки, діяльність операторів, відображення, інформаційний елемент.

### Вступ

**Постановка задачі.** В автоматизованих системах управління спеціального призначення, до яких в тому числі належать і автоматизовані системи управління повітряним рухом (АС УПР), зазвичай використовуються складні комплекси засобів відображення інформації (ЗВІ), що включають в свій склад пристрої відображення колективного, групового та індивідуального користування. Використання широкого спектру ЗВІ як колективного так і індивідуального користування забезпечує єдину основу для оцінки основних властивостей ситуації обстановки (СО), сприяє визначенню ступеню критичності ситуацій, що складаються і своєчасному вирішенню часткових завдань усіма операторами, що задіяні в процесі підготовки рішення. Цим забезпечується реалізація принципу єдиної мети всіма ланками системи, а також ефективне виконання завдань управління [1, 4, 9-12].

Якісне та ефективне вирішення завдань операторами АС УПР напряму залежить від стану системи інформаційного забезпечення (СІЗ). Одним з базових напрямків удосконалення СІЗ є необхідність адаптації системи інформаційних моделей (ІМ) до умов діяльності та специфіки завдань, що стоять перед особами, які приймають рішення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання вдосконалення інформаційного забезпечення

вирішення завдань управління складними комплексами і системами розглядаються у ряді робіт [2, 3, 5-8, 13-25]. Авторами обґрунтовано методи, проектування окремих елементів системи ІМ розглянутого класу та вироблено рекомендації, спрямовані на поліпшення їх ергономічних якостей.

Однак не розглянуто ряд основоположних моментів, характерних для вирішення завдань, що стоять перед операторами. Крім того недостатньо врахована специфіка функціональних завдань при формуванні інформаційних моделей СО.

Крім того розглянуті роботи, орієнтовані тільки на проектування таких ІМ, для яких характерна зміна стану цілком певних технічних засобів. При формуванні ІМ не враховано можливість змін ситуації обстановки. Склад, кількість інформаційних елементів ІМ і їх розміщення можуть змінюватись в широкому діапазоні. В даному ж випадку ми маємо справу з ІМ, для яких властива не тільки зміна в широкому діапазоні можливих станів контрольованих об'єктів, а й загального обсягу відображення.

**Мета і завдання даного дослідження.** З точки зору доцільності використання в практичних застосуваннях ІМ ситуації обстановки, що складається в зоні відповідальності відповідного органу управління може вважатися розподіленою між різними ЗВІ. У зв'язку з цим виникає завдання розподілу інформаційних ознак, що характеризують СО, між засобами відображення інформації таким чином,

щоб забезпечити максимальну ефективність оцінки обстановки ОПР.

Структура розподіленої інформаційної моделі ситуації обстановки повинна забезпечувати оперативне, надійне і адекватне сприйняття ситуації, що склалася. При цьому у операторів АС УПР повинно виникати цілісне сприйняття обстановки.

**Метою дослідження** є розробка методу проектування і синтезу інформаційних моделей для інформаційної підтримки прийняття рішень в АС УПР, який на відміну від існуючих має враховувати етапи діяльності та специфіку задач, що вирішуються операторами, з метою підвищення якості системи інформаційного забезпечення діяльності ОПР.

### Основна частина

Для вирішення порівняно нескладних завдань управління повітряним рухом в практичних застосуваннях доцільно використовувати лінійну або ієрархічну структуру ІМ. Її переваги реалізуються за умови явно виражених лінійних зв'язків між елементами контрольованих об'єктів і процесу оцінки їх стану. Також лінійну структуру найчастіше застосовують для побудови ІМ технічного стану складових елементів та складних технічних систем в цілому. Потрібно відмітити, що при використанні ієрархічної структури ІМ є можливим врахування зв'язків, які виникають при вирішенні операторами АС УПР часткових функціональних завдань.

Кількість рівнів узагальнення ( $K$ ) такої структури залежить від загальної кількості ІО (обсяг вихідного масиву даних, що характеризують завдання які необхідно вирішувати оператору) і кількості символів, що пред'являються в одній програмі відображення ІМ ( $A$ ), тобто

$$K = f(N, A, M), \quad (1)$$

де  $N$  – загальна кількість інформаційних елементів (ІЕ);  $M$  – кількість програм відображення.

Кількість ІЕ в одній програмі відображення знаходиться згідно виразу:

$$A = K\sqrt{N}. \quad (2)$$

Кількість програм відображення в такому випадку може бути визначено так:

$$M = \sum_{i=1}^k A_i^{i-1}. \quad (3)$$

Наведені співвідношення надають можливість оцінити характеристики структури ІМ на етапі її ергономічного проектування і визначити кількість інформаційних елементів в одній програмі відображення з урахуванням мінімізації часу пошуку заданих елементів. Структура такої ІМ відповідає апріорно відомим програмами відображення. Але невідомості ситуацій обстановки обмежують сферу застосування подібних структур.

У складній ситуації, коли перед ОПР може виникнути кілька відносно незалежних завдань оцінки СО, може знадобитися додаткова інформація, яка відображається в різних фрагментах ІМ. У тако-

му випадку доцільно використовувати функціональну структуру ІМ. Зазвичай для задовільних умов ситуацій обстановки, які складаються у поточному часі на практиці спільно використовуються лінійна та функціональна структури ІМ [9-12]. Якщо виникає необхідність деталізації фрагментів ІМ, тоді можливе використання елементів лінійної структури.

Для врахування можливих змін ситуацій обстановки, що призводять до необхідності суттєвого зростання обсягу інформації для відображення доцільно використовувати комбіновану структуру інформаційних моделей СО. Пропонований варіант комбінованої структури ІМ наведено на рис. 1.

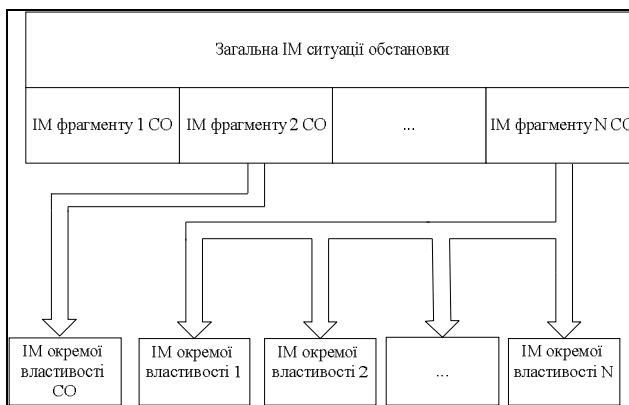


Рис. 1. Варіант комбінованої структури ІМ

Структурування системи ІМ забезпечує реалізацію принципу необхідної різноманітності при організації раціонального доступу до детальної інформації. Переваги комбінованої структури інформаційної моделі можуть бути реалізовані тільки при застосуванні відповідних ЗВІ та їх структури. При цьому для кожного засобу відображення інформації може бути розроблена своя структура інформаційної моделі відповідно до запропонованого варіанту структури ІМ. В якості пристроїв відображення колективного користування зазвичай застосовуються великі екрани і табло характеристик повітряних суден, табло метеоданих, тощо. Індивідуальні засоби відображення інформації входять до складу автоматизованих робочих місць операторів (диспетчерів автоматизованої системи управління повітряним рухом). Основні варіанти їх використання наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Варіанти використання ЗВІ індивідуального користування

Варіант побудови РМ	Варіанти використання інформаційного поля засобу відображення
1. Один ЗВІ	1. Відображення загальної СО 2. Відображення фрагментів СО
2. Один ЗВІ – поліекран	1. Основна частина екрана – відображення загальної СО 2. Вільні частини екрана – відображення фрагментів ІМ
3. Два ЗВІ: основний, ЗВІ <sub>б</sub> ; додатковий, ЗВІ <sub>д</sub> .	ЗВІ <sub>б</sub> – відображення загальної ІМ (частково варіант 1 побудови РМ) ЗВІ <sub>д</sub> – відображення фрагментів ІМ та їх деталей

Слід відзначити, що більш ніж 50-річний досвід ергономічних розробок застосування робочих місць з двома або більше ЗВІ для аналізу і оцінки СО підтверджує доцільність реалізації такого варіанту розподіленої ІМ.

Включення до складу спеціального програмного і математичного забезпечення ІУК АС УПР комплексу завдань підготовки та підтримки прийняття рішень призводить до необхідності перегляду підходів до формування ІЕ, що складають інформаційну модель СО. У зв'язку з цим необхідно розглядати питання пов'язані з формуванням концептуальних моделей в свідомості операторів, які тісно пов'язані з типом мислення операторів і тим, як здійснюється інформаційна взаємодія між ІУК та ОПрР.

Саме від того, як оператор сприймає інформацію від ІУК АС УПР і залежить швидкість і ефективність його рішень. Тому при обґрунтуванні форм представлення інформації про результати оцінки СО необхідно врахувати наступне:

інформаційні елементи повинні відповідати етапам оцінки СО і ергономічним принципам розробки ІМ;

зближення структури і змісту інформаційної та концептуальної моделей дозволить скоротити кількість операцій перекодування для переходу до концептуальної моделі;

форми подання інформації повинні відповідати досвіду і знанням оператора, його інтуїтивним поняттям, обліковувати особливості мислення ОПрР.

Для діяльності ОПрР при зміні обстановки і невизначеності даних про неї характерно оперативне мислення [10-12]. Воно є переважно образним. Тобто розумова діяльність ОПрР в більшості випадків нерозривно пов'язана з образами об'єктів обстановки – оперативними образами. Останні формуються в результаті зіставлення поточної інформації про об'єкти зі збереженою в пам'яті ОПрР. Таким чином, в якості оперативного образу розглядається певний набір інформації про об'єкти обстановки, що відображені у свідомості і активно взаємодіють з тією інформацією, яка видається в ІМ з урахуванням динаміки її зміни.

ІМ складається з множини інформаційних елементів, що узгоджені між собою для ефективного їх сприйняття оператором. Кожен ІЕ відображає абстрактне поняття або сукупність абстрактних понять. В оперативному образі оператора за допомогою ІЕ формуються концептуальні образи (КО), з яких формується КМ. Але для створення одного КО оператору доводиться проводити обробку, аналіз і узагальнення декількох ІЕ. Крім того, складність самого ІЕ призводить до збільшення часу його обробки. Множина ІЕ в складі ІМ перевантажує оперативну пам'ять оператора і є причиною виникнення помилок в оперативному мисленні. Неточності у формуванні КМ призводять до прийняття неефективних рішень і до збільшення часу вирішення завдань. Тому при проектуванні ІМ завдання розробки ІЕ є одним з найбільш складних і важкоформалізуємих.

У процесі управління операторам необхідно враховувати значну кількість факторів, які в сукупно-

сті складають КМ, необхідну для прийняття рішень. Тому виникає суперечність: ІЕ повинні представляти якомога більшу кількість абстрактних понять і при цьому бути простими. Крім того, ІЕ повинні підтримувати процес формування КМ у оператора при мінімальній кількості операцій перекодування. Все це дозволяє сформувати ряд вимог до ІЕ:

- інформативність;
- простота;
- придатність до швидкого сприйняття та аналізу оператором;
- можливість швидкого формування КМ;
- відповідність вимогам ергономічних стандартів.

Введення даних вимог дозволяє формалізувати процес розробки ІЕ і задовольнити вимоги по простоті і інформативності. Для зниження часу обробки ІЕ необхідно представити їх у формі образів, які б відображали взаємозв'язок параметрів і характеристик об'єктів і процесів, що протікають в аналізованій предметній області. В ідеалі образ ІЕ повинен при відносно простому кодуванні (формою, розміром, мерехтінням) відображати велику кількість інформації. Це дозволить при відносно малій кількості ІЕ створювати інформативні ІМ, ефективно перетворені в КМ оператором. Можливість регулювати параметри образів ІЕ, дозволяє ефективно компонувати і управляти їх відображенням, що дозволить створювати ІМ, максимально адаптовані до вимог операторів і важливості вирішуваних ними завдань.

Проілюструємо процес розробки вимог до форми ІЕ. Нехай необхідно представити у вигляді ІЕ складне поняття "завантаженість операторів ПУ щодо загального обсягу ПС". Послідовність процесу розробки має бути наступною:

- висунення вимог до інформаційного елементу;
- аналіз існуючої ІМ на відповідність встановленим вимогам;
- розробка варіантів ІЕ;
- дослідження ефективності використання запропонованих ІЕ;
- аналіз результатів;
- впровадження інформаційного елемента в інформаційну модель.

Послідовність та структура процесу визначення оптимального змісту та розроблення структури ІЕ наведено на рис. 2.

В ході проведення досліджень розроблено варіанти представлення поняття "завантаженості операторів ПУ щодо загального обсягу ПС" у вигляді ІЕ. Образи даного ІЕ представлені на рис. 3.

Відповідно до процедури розробки ІЕ отримані варіанти ІЕ було необхідно дослідити на питання можливості їх використання в ІМ АС УПР. З цієї метою розроблено експериментальну установку загального виду інтерфейсу якої наведено на рис. 4.

Для оцінки відповідності запропонованих ІЕ до розв'язуваних завдань було проведено експеримент, на підставі якого приймалося рішення щодо вибору ІЕ. В експерименті брали участь 44 оператори, при цьому досліджувалось вирішення в цілому 318 завдань.

В результаті отримані оцінки математичного сподівання часу обробки і ймовірності правильної інтерпретації інформаційних елементів в складі інформаційної моделі.

Результати експерименту для різних типів інформаційних елементів наведено в табл. 2.

За результатами проведеної оцінки інформаційних елементів можна прийти до висновку, що найкращим інформаційним елементом є "секторне коло" і його слід використовувати для відображення поняття "завантаженість операторів пункту управління щодо загального обсягу повітряної системи".

Отримані результати дозволяють представити структуру методу проектування і синтезу інформаційних моделей для підтримки прийняття рішень в автоматизованих системах управління повітряним рухом для умов невизначеної обстановки, що динамічно змінюється (рис. 5).



Рис. 2. Зміст та послідовність операцій процесу розробки ІЕ

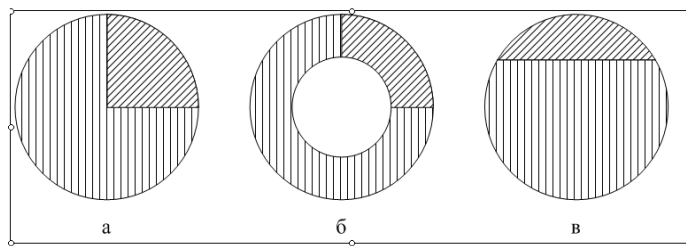


Рис. 3. Образи інформаційного елемента типу: а – "секторне коло"; б – "секторне кільце"; в – "поплавок"

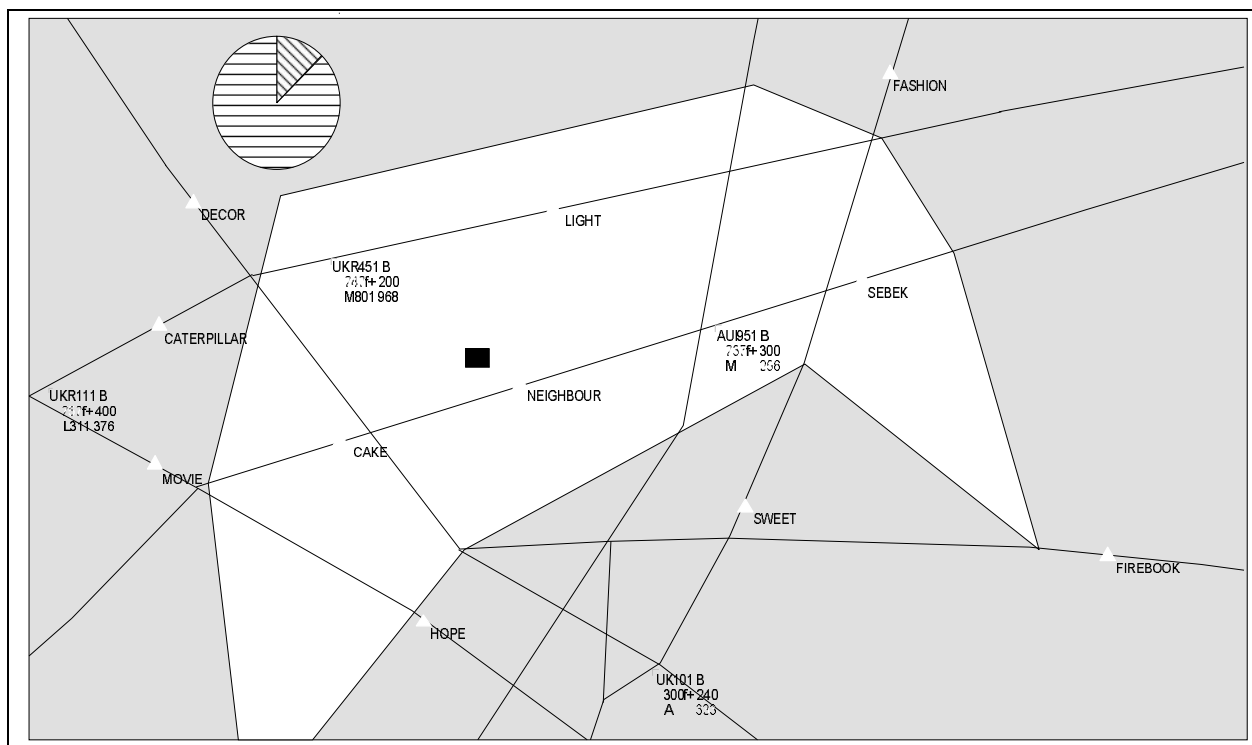


Рис. 4. Приклад лабораторної установки для дослідження якості ІЕ

Таблиця 2 – Результати експерименту

Параметри, що оцінювались	Тип інформаційного елементу		
	"поплавок"	"секторне коло"	"секторне кільце"
Математичне сподівання часу обробки, мс	5,439	4,960	5,928
Ймовірність правильної відповіді	0,50	0,78	0,52
Ймовірність помилки	0,5	0,22	0,48



Рис. 5. Структура методу проектування і синтезу інформаційних моделей для інформаційної підтримки прийняття рішень з оцінки обстановки

Таким чином, метод проектування і синтезу інформаційних моделей для інформаційної підтримки прийняття рішень в АС УПР на відміну від існуючих враховує етапи діяльності та специфіку задач, що вирішуються операторами, що в підсумку дозволяє суттєво покращити якість СІЗ діяльності ОПР.

### Висновки

Запропонована структура засобів відображення АС УПР відповідає інтелектуальній діяльності ОПР по оцінці СО, а розроблена структура подання інформаційних ознак є адекватною до етапів прийняття рішень ОПР, та забезпечує високі адаптивні властивості синтезованих ІМ до динаміки змін ситуації обстановки.

Подальшим напрямком досліджень доцільно розглянути питання щодо впливу перевантаження ІМ на ефективність діяльності операторів АС УПР.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Nolan, M. (2010), *Fundamentals of air traffic control*, Cengage learning.
- Card S. K. *The psychology of human-computer interaction*. – CRC Press, 2018. – 513 p.
- Mattsson S. *Towards increasing operator wellbeing and performance in complex assembly*. – Department of Industrial and Materials Science, Chalmers University of Technology, 2018. – 64 p.
- Isaac A. R., Ruitenber B. *Air traffic control: human performance factors*. – Routledge, 2017. – 365 p.
- Szalma J. L. *On the application of motivation theory to human factors/ergonomics: Motivational design principles for human-technology interaction // Human Factors*. – 2014. – Т. 56. – №. 8. – С. 1453-1471.
- Reason J. *Managing the risks of organizational accidents*. – Routledge. 2016. – 252 p.
- Dehais, F., Causse, M., and Tremblay, S. *Mitigation of conflicts with automation use of cognitive countermeasures*. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 53, 5 (2011), 448–460.
- Walter Bich. *Evolution of the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement'* / Walter Bich, Maurice G. Cox, Peter M. Harris. // *Metrologia*. – 2006. – № 43. – P. 161-166.
- Insaurralde C. C., Blasch E. *Ontological knowledge representation for avionics decision-making support // 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. – IEEE, 2016. – С. 1-8.
- Математические основы эргономических исследований: монография / П. Г. Бердник, Г. А. Кучук, Н. Г. Кучук, Д. Н. Обидин, М.А. Павленко, А.В. Петров, В.Н. Руденко, О.И. Тимочко. – Кропивницький: КЛІА НАУ, 2016. – 248 с.
- Формалізований опис процесу відбору інформаційних ознак для формування моделі повітряної обстановки / Ю. І. Полонський, І. О. Борозенець, С. Г. Шило, М. І. Литвиненко // *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. – 2016. – № 2. – С. 115-117.
- Полонський Ю. І. Метод відбору інформаційних ознак для формування моделі повітряної обстановки / Ю. І. Полонський, І. О. Борозенець, С. Г. Шило // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава: Полтавський національний технічний університет. – 2015. – № 2. – С. 109-112.
- Dehais, F., Causse, M., Vachon, F., and Tremblay, S. *Cognitive conflict in human-automation interactions: a psychophysiological study*. *Applied ergonomics* 43, 3(2012), 588–595.
- Sarter, N. B., Woods, D. D., and Billings, C. E. *Automation surprises (1997)*, 1926–1943.
- Кучук Г. А. Метод параметричного управління передачею даних для модифікації транспортних протоколів безпроводних мереж / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // *Системи обробки інформації*. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
- Sivaram, M., Batri, K., Amin Salih, Mohammed and Porkodi V. (2019), "Exploiting the Local Optima in Genetic Algorithm using Tabu Search", *Indian Journal of Science and Technology*, Volume 12, Issue 1, 2019. DOI: [10.17485/ijst/2019/v12i1/139577](https://doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i1/139577)

17. Sivaram M., Yuvaraj D., Amin Salih Mohammed, Porkodi, V., Manikandan V. The Real Problem Through a Selection Making an Algorithm that Minimizes the Computational Complexity. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2018. Vol. 8, iss. 2. pp. 95-100.
18. Pizziol, S., Tessier, C., and Dehais, F. Petri net-based modelling of human-automation conflicts in aviation. *Ergonomics* 57, 3 (2014), 319–331.
19. Diez, M., Boehm-Davis, D. A., Holt, R. W., Pinney, M. E., Hansberger, J. T., and Schoppek, W. Tracking pilot interactions with flight management systems through eye movements. In Proc. of the 11<sup>th</sup> Int. Symp. on Aviation Psychology (2001), 1–6.
20. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
21. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
22. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускну здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
23. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiently of image recognition process: Approach and case study”, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
24. Sarter, N. B., Mumaw, R. J., and Wickens, C. D. Pilots' monitoring strategies and performance on automated flight decks: An empirical study combining behavioral and eye-tracking data. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 49, 3(2007), 347–357.
25. Rushby, J. Using model checking to help discover modeconfusions and other automation surprises. *Reliability Engineering & System Safety* 75, 2 (2002), 167–177.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О. І. Тимочко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Received (Надійшла) 26.04.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.06.2019

#### **Метод проектирования и синтеза информационных моделей для оценки обстановки в автоматизированных системах управления воздушным движением**

М. А. Павленко, М. М. Петрушенко, С. Г. Шило, И. А. Борозенец, О. Н. Дмитриев

В статье приводится подход к проектированию и синтезу информационных моделей для системы информационного обеспечения лиц, принимающих решения в автоматизированных системах управления воздушным движением. Анализ возможных структур построения информационных моделей свидетельствует, что для сравнительно простых условий обстановки целесообразно использовать линейную или иерархическую структуру. Усложнение ситуаций обстановки ведут к существенному росту объема информации для отображения и тогда целесообразно использовать комбинированную структуру информационной модели. Приведены соотношения предоставляют возможность оценить характеристики структуры информационных моделей на этапе их эргономического проектирования и определить количество информационных элементов в одной программе отображения с учетом минимизации времени поиска заданных элементов. Рассмотрены возможные варианты совместного использования средств отображения информации индивидуального, группового и коллективного пользования. Предложена последовательность и содержание операций при разработке требований к форме информационных элементов. Приводятся исследования эффективности использования различных форм представления информационных элементов. В итоге представлены структура, содержание и последовательность этапов метода проектирования и синтеза информационных моделей для информационной поддержки принятия решений по оценке обстановки, который в отличие от существующих учитывает этапы деятельности и специфику задач, решаемых операторами в автоматизированных системах управления воздушным движением.

**Ключевые слова:** ситуация обстановки, деятельность операторов, отображение, информационный элемент.

#### **Method of design and synthesis of information models for evaluation of controls in an automated air traffic control system**

M. Pavlenko, M. Petrushenko, S. Shylo, I. Borozenec, O. Dmitriyev

The article gives an approach to the design and synthesis of information models for the information support system of decision makers in automated air traffic control systems. An analysis of possible structures for the construction of information models suggests that for relatively simple conditions of the situation it is advisable to use a linear or hierarchical structure. The complex situation of the situation leads to a significant increase in the amount of information to display, and then it is advisable to use the combined structure of the information model. The given relations provide an opportunity to evaluate the characteristics of the structure of information models at the stage of their ergonomic design and determine the number of information elements in one display program, taking into account the minimization of the search time of the specified elements. Possible ways of sharing the use of individual, group and collective information display tools are considered. The sequence and content of operations are proposed in developing requirements for the form of information elements. The study of the effectiveness of using different forms of presentation of information elements is presented. As a result, the structure, content and consistency of the stages of the method of designing and synthesizing information models for informational support of decision-making in the assessment of the situation are presented, which, in contrast to the existing ones, takes into account the stages of activity and the specifics of tasks solved by operators in automated air traffic control systems.

**Keywords:** situation, operator activity, mapping, information element.



А. В. Федоров, Г. В. Худов, Б. В. Бакуменко, К. А. Тахьян, С. М. Ковалевський

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## МЕТОД СИНХРОНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ПРИЙМАЧІВ ADS-B ПРИ ВЕДЕННІ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОЇ ОБСТАНОВКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ MLAT

**Предметом** вивчення в статті є метод синхронізації системи приймачів ADS-B з використанням технології MLAT. **Метою** є розробка методу синхронізації приймачів автоматичного залежного спостереження ADS-B при веденні радіолокаційного контролю з використанням технології MLAT. **Завдання:** аналіз факторів, що впливають на точність визначення координат повітряних об'єктів, стислий аналіз можливостей технології ADS-B, розробка методу синхронізації приймачів ADS-B з використанням технології MLAT. Використовуваними **методами** є: методи радіолокації, методи теорії прийому та обробки сигналів, визначення координат повітряних об'єктів. Отримані такі **результати**. Визначено фактори, що впливають на точність визначення координат повітряних об'єктів. Встановлено можливість застосування технології автоматичного залежного спостереження та технології мультилатерації для підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів. Встановлено, що для більш якісного визначення координат повітряних об'єктів необхідно забезпечити точність синхронізації приймачів менше 1 мкс. Розроблено метод синхронізації приймачів ADS-B при веденні радіолокаційного контролю повітряної обстановки з використанням технології MLAT, що забезпечує необхідну точність синхронізації. Запропоновано алгоритм, що реалізує метод синхронізації системи приймачів ADS-B з використанням технології мультилатерації. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Встановлено, що перевагами використання запропонованого методу синхронізації приймачів ADS-B є простота процесу синхронізації, можливість використання в якості контрольних об'єктів випадкові повітряні об'єкти, що оснащені транспондерами ADS-B та знаходяться в зоні дії системи приймачів ADS-B. В подальших дослідженнях пропонується використання запропонованого методу синхронізації системи приймачів ADS-B та його практичного використання при веденні радіолокаційного контролю повітряної обстановки.

**Ключові слова:** ADS-B, MLAT, синхронізація, повітряна обстановка, залежне спостереження, контроль повітряного простору, координати, GPS.

### Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** За останні десятиліття інтенсивність повітряного руху зросла у декілька разів. На даний момент в зоні відповідальності радіотехнічних підрозділів знаходиться велика кількість повітряних об'єктів (ПО) як цивільного так і військового призначення, що безумовно, ускладнює виконання завдань з ведення якісного та ефективного радіолокаційного контролю (РЛК) повітряної обстановки в зоні огляду радіолокаційних станцій (РЛС) радіотехнічних військ (РТВ). Можливості існуючих радіолокаційних засобів (РЛС різних діапазонів) щодо здійснення РЛК та видачі радіолокаційної інформації (РЛІ) з підвищеними вимогами до точності визначення координат ПО дещо обмежені [1].

У цей час в управлінні повітряним рухом (УПР) широко застосовується технологія мультилатерації (MLAT). Сутність технології MLAT полягає в тому, що система з декількох приймачів (мінімум трьох) здатна вимірювати координати ПО, навіть за умов, коли ПО не передає в простір інформацію про своє місцезнаходження. В якості приймачів системи MLAT використовуються приймачі ADS-B [2].

Для прийому даних ADS-B від ПО використовуються досить дешеві та малогабаритні радіоприймачі [3]. Отже, з'являється можливість підвищення точності визначення координат, та отримання додаткової інформації про ПО (тип ПО, його позивний тощо). Відомо [1], що одним із факторів, що впливає на точність визначення координат ПО є точна синх-

ронізація системи приймачів, що забезпечують визначення координат ПО з використанням технології MLAT, за часом, тому актуальним є розробка методу синхронізації системи приймачів ADS-B.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час майже 99% ПО, які знаходяться у повітряному просторі, обладнані транспондерами ADS-B та працюють в системі вторинної оглядової радіолокації для управління повітряним рухом (Radar Beacon System) [2]. Технологія ADS-B фактично є елементом режиму "S" системи RBS.

Автоматичне залежне спостереження (ADS-B) – це технологія коопераційного спостереження, в якій ПО визначає своє місцезнаходження через супутникову систему навігації та поширює його у простір. Цю інформацію можуть отримувати як наземні станції органів УПР, так і інші повітряні судна, що дає змогу екіпажам бути більш ситуаційно обізнаними [3]. Технологія ADS-B може функціонувати в двох режимах: "ADS-B Out" та "ADS-B In" [3].

В режимі "ADS-B Out" через бортовий передавач поширюється інформація про точне місцезнаходження, висоту та швидкість ПО, а також інші данні з бортових систем ПО.

В режимі "ADS-B In" приймається інформація з каналів FIS-B (польотно-інформаційного сервісу) та TIS-B (інформацію про інший рух), а також інші данні ADS-B, такі як пряме спілкування з ПО, які перебувають поблизу.

В порівнянні з сучасними радіолокаційними засобами данні про поточне положення ПО, що визначаються системою ADS-B, мають суттєво вищу точ-

ність через те, що координати ПО визначаються бортовим GPS навігатором.

Дискретність передачі координатних даних (2 рази за секунду) також суттєво менше дискретності даних від радіолокаційних засобів. Значення швидкості та курсу в більшості випадків також беруться з бортових GPS навігаторів, але можуть братися і з іншого бортового обладнання. В більшості випадків значення висоти береться з барометричного висотоміру ПО.

Однак не слід забувати, що далеко не всі, навіть сучасні ПО, обладнані апаратурою ADS-B. Але зараз практично всі ПО мають спроможність роботи в режимі "S" системи вторинної локації RBS. В режимі вторинної локації ПО відповідають на сигнали запитів трасових локаторів органів УПП. Відповідь здійснюється на тій же частоті, що і ADS-B, а саме 1090 МГц. Відповідно, приймач ADS-B здатен приймати і сигнали відповідей ПО на запити трасових локаторів. А так як ПО практично завжди здійснюють політ в полі трасових локаторів, то практично завжди присутні сигнали відповідей. Аналізуючи ці сигнали, можна отримати ті ж самі данні, що від ADS-B (інформація про висоту, адресу ICAO, SQUAWK, позивний) за винятком поточних координат [4]. Для визначення координат ПО, який не передає своїх координат доцільно використовувати технологію MLAT. По суті це відомий різницево-далекомірний багатопозиційний спосіб визначення координат. Для його використання потрібно обробляти сигнали щонайменше від трьох приймачів, маючих просторовий рознос та точну синхронізацію часу. Точна прив'язка часу (до 50 нс) може здійснюватися за допомогою GPS приймачів.

Відомо, що основними факторами, які впливають на точність визначення координат ПО, є [2]:

- тактико-технічні характеристики приймачів;
- відстань між приймачами системи;
- геометрична побудова системи приймачів з використанням технології MLAT;
- синхронізація приймачів в системі.

Якість роботи системи з використанням технології MLAT, в основному, залежить від точності синхронізації приймачів системи.

Технологію MLAT використовує широко відомий Інтернет ресурс "FlightRadar" [5], де здійснюється обробка сигналів від тисяч ADS-B приймачів.

**Метою статті** є розробка методу синхронізації системи приймачів ADS-B при веденні радіолокаційного контролю повітряної обстановки з використанням технології MLAT.

### Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Теоретично можливо забезпечити роботу системи в абсолютному часі, наприклад використовуючи синхронізацію за допомогою системи GPS та отримувати точний час. Однак, не слід забувати, що при точності синхронізації в 1 мкс похибка складатиме 300 м. Таким чином, для більш якісного визначення координат ПО необхідно забезпечити точність синхронізації менше 1 мкс.

Відомо, що навіть у сигналі відповіді, наприклад у системах держвпізнання ("Пароль", "Кремній-2") кожний імпульс більший за 1 мкс та складає близько 2-3 мкс [6-8]. Таким чином, коли мова йде про вимірювання часу необхідно визначитися, що саме розуміється під поняттям "час". Наприклад, це може бути фронт першого імпульсу. Крім того, зробити точний годинник на кожному пункті прийому не є проблемою, ця задача може бути вирішена з використанням кварцового генератора [9]. Однак виникає проблема синхронізації цих годинників.

**Сутність методу синхронізації.** Отже, на кожному приймальному пункті маємо годинник, однак ці годинники не синхронізовані.

Схема розміщення приймачів системи MLAT показана на рис. 1.

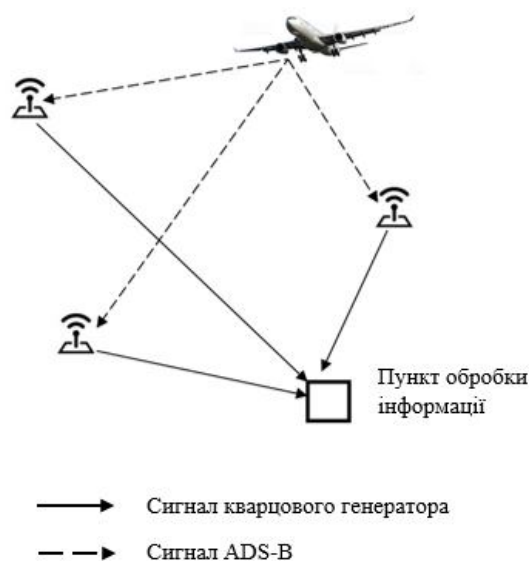


Рис. 1. Схема розміщення системи приймачів ADS-B

До кожного повідомлення, яке приймається, додається значення регістру (час прийому сигналу). Ці данні передаються на пункт обробки. Самі по собі ці данні не несуть корисної інформації, оскільки інформація про координати відсутня, а годинники на пунктах прийому не синхронізовані. Однак, не слід забувати, що на пунктах прийому в якості приймачів використовуються приймачі ADS-B, які здатні приймати сигнали від ПО, обладнаного відповідною апаратурою ADS-B на частоті 1090 МГц. Таким чином, якщо в зоні дії системи приймачів з'являється ПО, який передає у простір свої координати, є можливість використовувати їх у якості еталонних. Крім того, можна свідомо направити в зону відповідальності радіотехнічних підрозділів ПО, обладнаний відповідною апаратурою ADS-B та використовувати сигнал від нього в якості еталонного. Знаючи точні координати ПО, які передаються з борту ПО за даними системи ADS-B, є можливість визначити еталонну різницю часу приходу сигналу між окремими пунктами прийому та різницю значень кварцових генераторів між тими ж пунктами прийому. Значення поправки, використовуючи яке, можна забезпечити синхронізацію за часом між приймачами

системи, визначається як

$$P = \Delta t_{ADS-B} - \Delta t_{КГ}, \quad (1)$$

де  $\Delta t_{КГ}$  – різниця значень кварцових генераторів між окремими пунктами прийому;  $\Delta t_{ADS-B}$  – еталонна різниця часу приходу сигналу між окремими пунктами прийому.

Використовуючи технологію MLAT та маючи значення поправки  $P$  для кожного пункту прийому, можна враховувати її кожного разу, коли ПО, що знаходиться в зоні дії системи, не передає свої координати.

Алгоритм, що реалізує метод синхронізації системи приймачів ADS-B з використанням технології MLAT, наведено на рис. 2.

На першому етапі здійснюється прийом повідомлень (сигналів) від ПО, що оснащені апаратурою ADS-B.

На другому етапі здійснюється прикріплення до кожного повідомлення значень часу кварцових генераторів на кожному пункті прийому та передача даних на пункт обробки інформації.

На третьому етапі за виразами (2), (3) та (4) обчислюються різниці часу приходу сигналу за даними ADS-B та за виразом (5) – різниця часу приходу сигналу за даними кварцового генератору:

$$t_1 = D_1/c, \quad (2)$$

$$t_2 = D_2/c, \quad (3)$$

$$\Delta t_{ADS-B} = t_1 - t_2, \quad (4)$$

де  $D_1$  – відстань від ПО до першого приймача;  $D_2$  – відстань від ПО до другого приймача;  $c$  – швидкість світла;  $t_1, t_2$  – час приходу сигналу на перший та другий приймач відповідно;

$$t_{КГ} = t_{1КГ} - t_{2КГ}, \quad (5)$$

де  $t_{1КГ}, t_{2КГ}$  – час прийому сигналу від ПО на першому та другому кварцовому генераторі відповідно.

На четвертому етапі обчислюється часова поправка за виразом (1). На п'ятому етапі, знаючи точне значення часової поправки для кожного пункту прийому, за виразом (6) здійснюється корегування (синхронізація) приймачів системи ADS-B з використанням технології MLAT:

$$t = \Delta t_{КГ} + P. \quad (6)$$

За необхідністю корегування можна проводити з певною періодичністю.

### Висновки і напрямки подальших досліджень

Основними перевагами запропонованого методу синхронізації системи приймачів ADS-B при веденні РЛК повітряної обстановки з використанням технології MLAT є можливість використання в якості контрольних об'єктів випадкових ПО, що пролітають в зоні відповідальності радіотехнічних підрозділів та оснащені транспондерами ADS-B. Крім того, синхронізація може проводитися в автоматичному режимі. Корегування поправок може здійснюватися з певною періодичністю. Використання даного методу може значно підвищити точність синхронізації що забезпечить більш точне визначення координат ПО, навіть якщо ПО не обладнане відповідною апаратурою ADS-B. **Напрямок подальших досліджень** є практичне застосування розробленого методу для синхронізації системи приймачів ADS-B з використанням технології мультилатерації.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. – Красноярск : СФУ, 2011. – 536 с.
2. Маляренко А.С. Системи вторинної радіолокації для управління повітряним рухом та державного впізнання / А.С. Маляренко. – Х.: ХУВС, 2007. – 78 с.

3. Standards of USA (2009), "RTCA DO-260B. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Inf. Services – Broadcast (TIS-B)", Washington, p. 185.
4. Лещенко С.П. Використання інформації ADS-B в інтересах підвищення якості ведення радіолокаційної розвідки повітряного простору / С.П. Лещенко, О.М. Колесник, С.А. Грицаєнко, С.І. Бурковський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХНУПС, 2017. – Вип. № 3(28). – С. 69–75.
5. Flightradar24. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [www.flightradar24.com](http://www.flightradar24.com).
6. ГОСТ 25620-83 Системы вторичной радиолокации для управления воздушным движением. Методы измерений основных параметров.
7. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман. – М.: Сов.радио, 1970. – 560 с.
8. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svytydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. Studies in Systems, Decision and Control, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
9. Хоменко И. В. Кварцевые резонаторы и генераторы : учеб. пособие / И. В. Хоменко, А. В. Косых : Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018. – 160 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. К. С. Васюта

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Received (Надійшла) 11.06.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.07.2019

### Метод синхронизации системы приемников ADS-B при ведении радиолокационного контроля воздушной обстановки с использованием технологии MLAT

А. В. Федоров, Г. В. Худов, Б. В. Бакуменко, К. А. Тахьян, С. Н. Ковалевский

**Предметом** изучения в статье является метод синхронизации системы приемников ADS-B с использованием технологии MLAT. **Целью** является разработка метода синхронизации приемников автоматического зависящего наблюдения ADS-B при ведении радиолокационного контроля с использованием технологии MLAT. **Задачи:** анализ факторов, влияющих на точность определения координат воздушных объектов, краткий анализ возможностей технологии ADS-B, разработка метода синхронизации приемников ADS-B с использованием технологии MLAT. Используемыми **методами** являются: методы радиолокации, методы теории приема и обработки сигналов, определения координат воздушных объектов. Получены следующие **результаты**. Определены факторы, влияющие на точность определения координат воздушных объектов. Установлена возможность применения технологии автоматического зависящего наблюдения и технологии мультилатерации для повышения точности определения координат воздушных объектов. Установлено, что для качественного определения координат воздушных объектов необходимо обеспечить точность синхронизации приемников менее 1 мкс. Разработан метод синхронизации приемников ADS-B при ведении радиолокационного контроля воздушной обстановки с использованием технологии MLAT, что обеспечивает необходимую точность синхронизации. Предложен алгоритм, реализующий метод синхронизации системы приемников ADS-B с использованием технологии мультилатерации. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем. Установлено, что преимуществами использования предложенного метода синхронизации приемников ADS-B является простота процесса синхронизации, возможность использования в качестве контрольных объектов случайные воздушные объекты, оснащенные транспондерами ADS-B и находятся в зоне действия системы приемников ADS-B. В дальнейших исследованиях предлагается использование предложенного метода синхронизации системы приемников ADS-B и его практического применения при ведении радиолокационного контроля воздушной обстановки.

**Ключевые слова:** ADS-B, MLAT, синхронизация, воздушная обстановка, зависящее наблюдение, контроль воздушного пространства, координаты, GPS.

### Method of synchronization the ADS-B receivers system for the radar aircraft control with MLAT technology use

A. Fedorov, G. Hudov, B. Bakumenko, K. Tahyan, S. Kovalevskyi

The **subject matter** of the article is method of synchronization the ADS-B receivers system with MLAT technology use. The **goal** is to develop a method for synchronizing auto-dependent observation receivers ADS-B during conducting radar control with MLAT technology use. The **task** to analysis of the factors influencing the accuracy of the determination of airspace coordinates, a brief analysis of the ADS-B technology, and development the method of synchronization the ADS-B receivers system for the radar aircraft control with MLAT technology use. The **methods** used are: radar methods, methods of the theory of reception and processing of signals, determination of coordinates of air objects. The following **results** are obtained. The factors influencing accuracy of determination of coordinates of air objects are determined. The possibility of application of the technology of automatic dependent observation has been established to improve the accuracy of the determination of the coordinates of air objects. The method of synchronization the ADS-B receivers system for the radar aircraft control with MLAT technology use is developed. It is established that in order to better determine the coordinates of air objects, it is necessary to ensure the accuracy of synchronization of receivers of less than 1 microsecond. The method of synchronizing ADS-B receivers with radar control of the airspace with the use of MLAT technology has been developed, which provides the necessary precision of synchronization. The algorithm that implements the method of synchronization of the ADS-B receivers system using the technology of multilateration is proposed. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained is as follows. It is established that the advantages of using the proposed ADS-B receiver synchronization method are the simplicity of the synchronization process, the possibility of using random objects of airborne objects equipped with ADS-B transponders and are in the action zone of the ADS-B receivers system as control objects. Further research suggests to use the proposed method of synchronizing the ADS-B receivers system and its practical use in conducting radar control of the airspace.

**Keywords:** ADS-B, MLAT, synchronization, air traffic, dependent monitoring, airspace control, coordinates, GPS.

В. Б. Кононов, О. А. Кононова, Н. В. Соломіна

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТУ АКУСТИЧНОГО ВІДОБРАЖЕННЯ ВІД ДОВЖИНИ КАБЕЛЮ ПРИ РОЗІМКНеноМУ І ЗІМКНеноМУ СТАНІ ПРИЛАДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ

**Предметом** вивчення в статті є залежності коефіцієнту акустичного відображення від довжини кабелю при розімкненому і зімкненому стані приладів ідентифікації, що необхідний для отримання заданого значення коефіцієнту акустичного відображення сигналу. **Метою статті** є визначення впливу зовнішнього навантаження на амплітуду вихідного сигналу у пристроях радіочастотної системи ідентифікації об'єктів на акустичних поверхневих хвилях. **Задача, що вирішується**, – обґрунтування технічних рішень, впровадження яких в практику вимірювання дозволять визначити методику оцінки залежності коефіцієнту акустичного відображення від довжини кабелю при розімкненому і зімкненому стані приладів ідентифікації об'єктів. **Висновки:** запропоновані технічні рішення, що отримані при експериментальному дослідженні підтвердили резонансну залежність амплітуди сигналу, який відображується, від реактивності дозволяють рекомендувати визначити методи затримки в якості вторинного перетворювача, який модулює електричний сигнал в відповідності зі зміною електричних параметрів первинного вимірювального перетворювача. Це надає обслузі радіочастотної системи ідентифікації об'єктів можливість використання коаксіального кабелю в якості елемента, який навантажується чи узгоджується, для створення різних сенсорів

**Ключові слова:** коефіцієнт акустичного відображення, амплітуда вихідного сигналу, лінія затримки.

### Вступ

**Постановка задачі.** Для забезпечення точного виміру амплітуди вихідного сигналу у радіотехнічних пристроях на амплітуду вихідного сигналу на акустичних поверхневих хвилях здійснюється детектування інфразвукових хвиль об'єктів, які мають великі геометричні розміри. Теоретичне дослідження характеру впливу електричного навантаження, яке підключається до зустрічно-штирьового перетворювача радіочастотної системи ідентифікації об'єктів, а також експериментальне підтвердження резонансної залежності амплітуди сигналу, який відображується, від реактивності дозволяють рекомендувати лінію затримки, що відображується в якості вторинного перетворювача, що модулює електричний сигнал в відповідності зі зміною електричних параметрів первинного вимірювального перетворювача. Тому дослідження впливу зовнішнього навантаження на амплітуду вихідного сигналу у пристроях радіочастотної системи ідентифікації об'єктів на акустичних поверхневих хвилях є актуальною науково-технічною задачею при повірці радіотехнічних зразків, визначає актуальність статті.

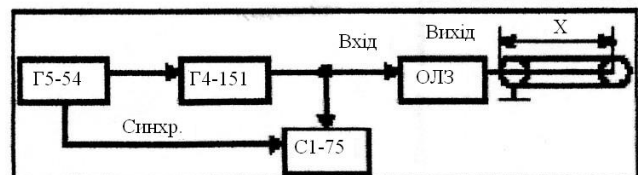
**Аналіз літератури.** Принципи й організаційні основи метрологічного забезпечення, а також роль й місце метрологічного забезпечення Збройних Сил України, викладено в статтях авторів [1, 2] та джерелах [3-15]. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості викладено в статтях [1]. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення викладено в статті [2]. Основи експлуатації засобів

вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО викладені в літературі [8-15]. Але в [1-15] питання, які пов'язані із визначенням впливу зовнішнього навантаження на амплітуду вихідного сигналу у пристроях радіочастотної системи ідентифікації об'єктів на акустичних поверхневих хвилях, не розглядалися.

**Метою статті** є визначення впливу зовнішнього навантаження на амплітуду вихідного сигналу у пристроях радіочастотної системи ідентифікації об'єктів на акустичних поверхневих хвилях.

### Основний матеріал

Перш за все розглянемо залежності коефіцієнту акустичного відображення від довжини кабелю при розімкненому і зімкненому стані приладів ідентифікації об'єктів супротивника підрозділами РТВ ППО ЗС України в умовах проведення операції Об'єднаних сил за схемою на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема дослідження залежності коефіцієнту акустичного відображення від довжини кабелю при розімкненому і зімкненому стані

Коаксіальний кабель типу РК 50-1-21 визначається такими параметрами [2]:  $\rho = 50$  Ом – хвильовий опір кабелю;  $C_{II} = 95$  пФ/м – погонна ємність;  $K_{y0} = 1,41$  – коефіцієнт скорочення довжини хвилі;  $\tau = 2$  – діелектрична проникність фторопласту Ф4

( $\tau$  – період резонансної частоти). Вхідний імпеданс кабелю з підключеним навантаженням опору  $Z_H$  визначається за формулою:

$$Z_{ex} = (Z_H + l\omega \operatorname{tg}(\beta X)) / (1 + l \cdot Z_H \cdot \operatorname{tg}(\beta X) / \rho), \quad (1)$$

де  $\omega$  – кутова частота;  $l$  – довжина;  $\rho$  – густина;  $x$  – положення рівноваги;  $\beta$  – одиниця вимірювання децибел (дБ). Вираз для вхідного імпедансу кабелю, який розімкнено на кінці, є таким:

$$Z_{ex}(X) = -l\rho \operatorname{ctg}(\beta X). \quad (2)$$

Залежність коефіцієнту акустичного відображення від довжини кабелю в розімкненому стані показана на рис. 2.

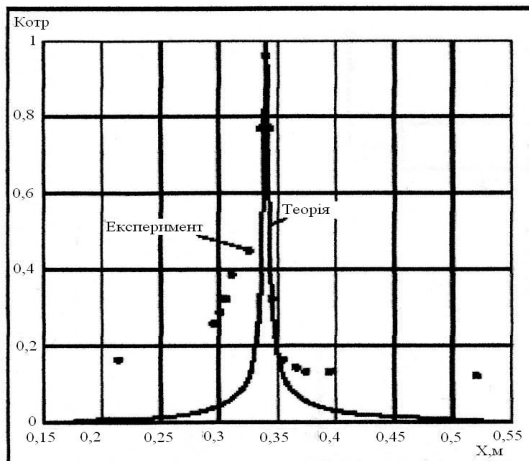


Рис. 2. Залежність коефіцієнту акустичного відображення від довжини кабелю в розімкненому стані

Для коаксіального кабелю, який замкнуто на кінці, формула (2) приймає вигляд:

$$Z_{ex}(X) = l\rho \operatorname{tg}(\beta X), \quad (3)$$

де  $X$  – довжина кабелю;  $\beta = \omega_0 / v$  – фазова стала.

Використовуючи коефіцієнт скорочення, фазову постійну можна визначити як

$$\begin{aligned} \beta &= \omega_0 K_{ук} / v_C = \\ &= 2\pi 300 \times 10^6 \cdot 1,41 / 3 \times 10^8 = 8,85 \text{ [рад / м]}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $v_C$  – швидкість світла;  $\omega_0$  – центральна частота. Тоді модуль коефіцієнта відображення

$$|K_{OTP}(Y_W)| = \left| \frac{G_0}{G_0 + i\omega_0 C_T + Y_W} \right|, \quad (5)$$

де  $G_0$  – активна складова акустичної провідності зустрічно-штирьового перетворювача;  $C_T$  – статистична ємність зустрічно-штирьового перетворювача;  $Y_W$  – провідність навантаження, отже:

$$|K_{розімкнен}(X)| = \left| \frac{G_0}{G_0 + l\omega_0 C_T - 1/(150 \operatorname{ctg} 8,85X)} \right|; \quad (6)$$

$$|K_{зімкнен}(X)| = \left| \frac{G_0}{G_0 + l\omega_0 C_T + 1/(150 \operatorname{ctg} 8,85X)} \right|. \quad (7)$$

Експериментальна оцінка впливу навантаження на вихідний сигнал проводилася на лабораторному стенді. До відображувачої лінії затримки підключався коаксіальний кабель, розімкнутий на кінці. З імпульсного генератора Г5-54 модульований відеосигнал надходить на високочастотний генератор Г4-151. В результаті радіосигнал з заповненням 300МГц і амплітудою  $A_{ПАД}$  надходить на відображувач ліній затримки, де відбувається пряме і зворотне перетворення електричного і акустичного сигналів і в результаті на виході відображувачої лінії затримки виникає електричний сигнал з амплітудою  $A_{ОТР}$ , зміщений відносно  $A_{ПАД}$  на час затримки. Падаючий і відображений сигнали фіксуються на екрані осцилографу С1-75. Амплітуда відображеного електричного сигналу пропорційна коефіцієнту відображення від навантаженого зустрічно-штирьового перетворювача з коефіцієнтом пропорційності, враховуючим втрати на перетворення і розповсюдження поверхневих акустичних хвиль:

$$\tau A_{ОТР} / A_{ПАД} = K_{ОТР}. \quad (8)$$

Зміною довжини кабелю  $X$  шляхом його скорочення на фіксоване значення вимірювалася відповідна амплітуда  $A_{ОТР}$ . Частота  $\omega_0$  і амплітуда  $A_{ПАД}$  на протязі проведення експерименту не змінились. Коефіцієнт  $\tau$  визначався з виразу:

$$\tau_{вих}(A_{ОТР} / A_{ПАД}) = 1. \quad (9)$$

Як відомо, розімкнена на кінці лінія має вхідний імпеданс, який змінюється як по своєму характеру, так і по величині в залежності від довжини кабелю. При довжині кабелю від  $2/4(177\text{мм})$  до  $2/2(355\text{мм})$   $Z_{ХХ}$  можна вважати індуктивним, в цьому випадку можна розрахувати значення індуктивності від довжини кабелю:

$$L(X) = |Z_{ХХ}(X)| / \omega_0. \quad (10)$$

При довжині кабелю від  $z/2(355\text{мм})$  до  $3z/4(532\text{мм})$   $Z_{ХХ}$  має ємнісний характер:

$$C(X) = 1 / (|Z_{ХХ}(X)| \omega_0). \quad (11)$$

З формул (10), (11) визначаємо довжину кабелю, при якій реалізується значення індуктивності, яке компенсує статичну ємність перетворювача –  $X_0 = 0,345\text{м}$ . Таким чином, при підключенні коаксіального кабелю довжиною  $X_0$  коефіцієнт відображення від зустрічно-штирьового перетворювача буде максимальним. За допомогою виразів (11) і (10) побудована залежність коефіцієнта відображення від індуктивності (рис. 3) та ємності (рис. 4).

Аналізуючи теоретичні та експериментальні результати, можна зробити наступні висновки.

1. Підключення до лінії затримки, яка відображується, реактивного навантаження з величиною, яка змінюється, дозволяє ефективно керувати амплітудою вихідного сигналу.

2. Найбільша зміна коефіцієнта відображення, а отже і зміна амплітуди сигналу, який відображується, спостерігається при індуктивному навантаженні поблизу значення індуктивності, яка компенсує статичну ємність перетворювача.

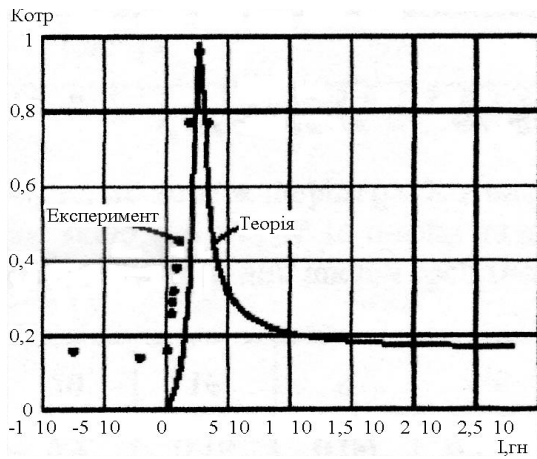


Рис. 3. Залежність коефіцієнту акустичного відображення від значення індуктивності

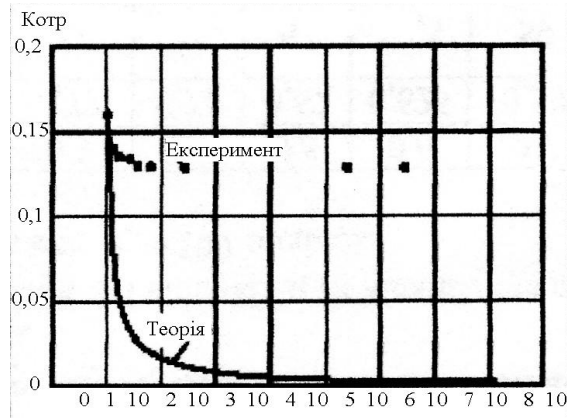


Рис. 4. Залежність коефіцієнту акустичного відображення від значення ємності

3. Експериментально визначений коефіцієнт відображення не обертається в нуль на відміну від теоретичного значення тому, що розрахунок коефіцієнту відображення за формулою (11) не дозволяє врахувати інші механізми відображення від електронної структури зустрічно-штирьового перетворювача.

Інший варіант реалізації вхідного опору індуктивного характеру, який має величину, яка компенсує статичну ємність перетворювача, потребує підключення коаксіального кабелю визначеної довжини з ємнісним навантаженням. Таке підключення представляє інтерес в зв'язку з широкими можливостями, які відкриваються, створення чутливих ємнісних елементів. Прирівнюючи вираз (11) для вхідного опору кабелю  $Z_{BX} = l\omega L_{комп}$  з підключеним навантаженням опору  $Z_H = 1/(l\omega C)$ , не важко отримати відповідність довжини кабелю і ємнісного навантаження, яке підключають:

$$C(X) = \frac{\rho + L_{комп}\omega \operatorname{tg}(\beta X)}{\rho^2 \omega \operatorname{tg}(\beta X) - \rho\omega^2 L_{комп}}, \quad (12)$$

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кононов В.Б., Бурцева В.В. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. ХНУПС. – Вип.1 (147). – Харків, 2017. – С. 88–92.
2. Кононов В.Б. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів виміральної техніки військового призначення // АКТТ. – Харків: НАУ ХАІ—2011.-№ 8 (85). – С.231–234.

де  $\rho=50$  Ом;  $L_{комп}=0,26 \times 10^{-6}$  Гн;  $\beta=8,85$ ;  $\omega=300 \times 10^6 \times 2\pi$  – циклічна частота.

Величина модулю коефіцієнту акустичного відображення на робочій частоті визначається виразом (5), де  $Y_H = 1/Z_{ex}$ , а  $Z_{ex}$  знаходиться з формули (1). Відповідний графік залежності коефіцієнту акустичного відображення від ємності, яка навантажується, при різних довжинах кабелю подано на рис. 5.

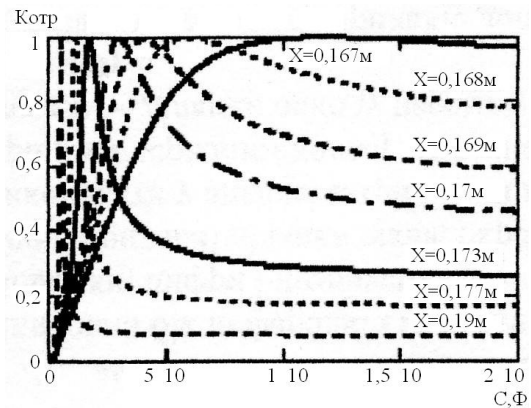


Рис. 5. Залежність коефіцієнту акустичного відображення від значення ємності, що навантажується, при різній довжині кабелю

Розглянута множина характеристик забезпечує різні варіації довжини кабелю при високій чутливості коефіцієнту акустичного відображення до зміни ємності, яка навантажується.

Висновки

1. За результатами проведеного дослідження залежності коефіцієнту акустичного відображення від довжини кабелю при розімкненому і зімкненому стані приладів ідентифікації об'єктів авторами вирішена задача впливу зовнішнього навантаження на амплітуду вихідного сигналу у пристроях радіочастотної системи ідентифікації об'єктів на акустичних поверхневих хвилях.

2. Проведене теоретичне дослідження характеру впливу електричного навантаження, яке підключається до зустрічно-штирьового перетворювача, і експериментальне підтвердження резонансної залежності амплітуди сигналу, який відображується, від реактивності дозволяють рекомендувати відображувачу лінію затримки в якості вторинного перетворювача, який модулює електричний сигнал в відповідності зі зміною електричних параметрів первинного вимірювального перетворювача.

3. Використання коаксіального кабелю в якості елемента, який навантажується чи узгоджується, відкриває широкі можливості для створення різних сенсорів.

3. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
4. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
5. Коваленко А. А. Подходы к синтезу информационной структуры системы управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2014. – № 1(117). – С. 180-184.
6. Коваленко А. А. Подходы к синтезу технической структуры компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2014. – № 1(38). – С. 116-119.
7. Dhivakar B., Saravanan S.V., Sivaram M., Krishnan R.A. Statistical Score Calculation of Information Retrieval Systems using Data Fusion Technique". *Computer Science and Engineering*. 2012. Vol. 2, Issue 5. pp.43-45. DOI: <http://doi.org/10.5923/j.computer.20120205.01>
8. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
9. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускну здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
10. Кононов В.Б., Науменко А.М., Водолажко О.В., Коваль О.В., Кондрашова І.І. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. – Навч. посібник. - Харків: ХНУПС, 2017. –288 с.
11. Кононов В.Б. Застосування електричних вимірювань засобами вимірювальної техніки в умовах проведення АТО: навч. посіб./ В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. Коваль та ін.. – Х.:ХНУПС, 2018. – 392 с.
12. Кононов В.Б. Instrumentation and general principles of sensors. Part 1: навч. посіб./ В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. Коваль та ін. – Х.:ХНУПС, 2018. – 64 с.
13. Організація метрологічного забезпечення військ (сил). Ч. 1 : навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, П. М. Яблонський. – К. : НУОУ, 2009. – 356 с.
14. Організація застосування пересувних засобів метрологічного обслуговування: навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, О. В. Ярошенко. – К. : НУОУ, 2009. – 356 с.
15. Кузнецов І. Б., Марценківський В. Т., Ярошенко О. В., Буяло О. В., Проценко В. О. Удосконалення парку пересувних лабораторій вимірювальної техніки як фактор підвищення оперативності та ефективності метрологічного обслуговування складних систем // Збірник наукових праць КНУ ім. Т. Шевченка. Вип. 32. – К. : ВІКНУ, 2011. – С. 33–46.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. І. Кондрашов,

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Received (Надійшла) 14.05.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.06.2019

### Исследование зависимости коэффициента акустического отображения от длины кабеля при разомкнутом и замкнутом положении приборов идентификации объектов

В. Б. Кононов, Е. А. Кононова, Н.В. Соломіна

**Предметом** изучения статьи являются зависимости коэффициента акустического отображения от длины кабеля при разомкнутом и замкнутом состоянии приборов идентификации объектов, необходимый для получения заданного значения коэффициента акустического отображения сигнала. **Целью статьи** является определения влияния внешней нагрузки на амплитуду входного сигнала в устройствах радиочастотной системы идентификации объектов на акустических поверхностных волнах. **Решаемая задача** – обоснование технических решений, внедрение которых в практику измерений позволят определить методику оценки зависимости коэффициента акустического отображения сигнала от длины кабеля при разомкнутом и замкнутом состоянии приборов идентификации объектов. **Выводы:** предложенные технические решения, полученные при экспериментальном исследовании, подтвердили резонансную зависимость амплитуды сигнала, который отображается, от реактивности позволяет рекомендовать определенные методы задержки в качестве вторичного преобразования, который модулирует электрический сигнал в соответствии с изменением электрических параметров первичного измерительного преобразователя. Это даёт обслуживающему персоналу радиочастотной системы идентификации объектов возможность использования коаксиального кабеля в качестве элемента, который возможно использовать при построении разных сенсоров.

**Ключевые слова:** коэффициент акустического отображения, амплитуда выходного сигнала, линия задержки.

### Investigation of the dependence of the acoustic mapping coefficient on the cable length at open and closed position of object identification devices

V. Kononov, O. Kononova, N. Solomina

**The subject** of the study of the article are the dependences of the coefficient of the active display of the cable at the open and closed state of the instrumentation required for the value of the co-ferment of the signal display mapping. **The purpose of the article is** determination the influence of external load on the amplitude of the input signal in the devices of the radio frequency system. **The task** is to substantiation of the technical solutions, the introduction of which into the practice of measurement allows us to determine the metrology of assessing the dependence of the coefficient. **Conclusions:** proposed technical solutions will allow to define methods of experimental study confirmed the resonant dependent amplitude of the signal that is displayed on the reactivity allows us to recommend identified delay methods as a secondary transducer. This gives the staff of the radio frequency identification system cheating the possibility of using coaxial cable as a clement that can be used to build different sensors.

**Keywords:** coefficient of acoustic mapping, amplitude of the input signal, display delay line.



Л. І. Леві

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАТРАТ І ВИТРАТ ВОДИ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

Метою керування водним режимом ґрунту є отримання планового врожаю сільськогосподарських культур. Сучасні методи розрахунку зрошувальних систем та управління ними вимагають використання кількісних зв'язків між водним режимом ґрунту та врожайністю культур. Існують підходи по зв'язуванню врожайності із сумарним випаровуванням, коефіцієнтом вологозабезпеченості, опадами, кількістю днів, в які рослини відчують водний стрес. Найдосконалішими є динамічні моделі формування врожаю, в яких враховуються всі основні чинники життєдіяльності рослин. Вони інваріантні, але для їх практичного застосування необхідно визначати велику кількість недостатньо вивчених на даний час чинників зовнішнього середовища та фізіології рослин, що змінюються у часі за видами та сортами рослин. За фізіологічними властивостями розрізняють два типи культур. До першого типу належать культури, що мають яскраво виражені критичні періоди, наприклад, зернові, для яких недостатнє водопостачання під час цвітіння має необоротний згубний вплив на обсяг врожаю; до другого - культури, наприклад, трави, які можуть переносити підсушування ґрунту протягом невеликого періоду і після цього цілком відновлювати врожай за оптимального водоспоживання. В таких моделях кожна попередня фаза розвитку рослин впливає на зростання і розвиток у наступній фазі. В роботі застосовано інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур. Даний підхід дозволяє економити водні та енергетичні ресурси при керуванні вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур без втрат врожайності.

**Ключові слова:** інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень, оптимальне керування вологозабезпеченістю, багатокритеріальність, нео-фаззі модель об'єкта керування, принцип головного критерію, схема максимуму.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Метою керування водним режимом ґрунту є отримання планового врожаю сільськогосподарських культур. Сучасні методи розрахунку зрошувальних систем та управління ними вимагають використання кількісних зв'язків між водним режимом ґрунту та врожайністю культур. Існують підходи по зв'язуванню врожайності із сумарним випаровуванням, коефіцієнтом вологозабезпеченості, опадами, кількістю днів, в які рослини відчують водний стрес. Найдосконалішими є динамічні моделі формування врожаю, в яких враховуються всі основні чинники життєдіяльності рослин. Вони інваріантні, але для їх практичного застосування необхідно визначати велику кількість недостатньо вивчених на даний час чинників зовнішнього середовища та фізіології рослин, що змінюються у часі за видами та сортами рослин [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для практичних цілей для кількісної оцінки врожаю в [2] запропонована наступна нелінійна модель у вигляді добутку двох функцій:

$$y = F(W_1, \dots, W_n) \cdot y^p(\theta_1, \dots, \theta_n), \quad (1)$$

де  $F(W_1, \dots, W_n)$  - функція залежності врожаю від динаміки вологості ґрунту за фазами розвитку сільськогосподарської культури;

$y^p(\theta_1, \dots, \theta_n)$  - плановий врожай сільськогосподарської культури у разі оптимального водоспоживання, який є залежним від рівня елементів живлення  $\theta_1, \dots, \theta_n$ .

За фізіологічними властивостями розрізняють два типи культур. До першого типу належать культури, що мають яскраво виражені критичні періоди, наприклад, зернові, для яких недостатнє водопостачання під час цвітіння має необоротний згубний вплив на обсяг врожаю; до другого - культури, наприклад, трави, які можуть переносити підсушування ґрунту протягом невеликого періоду і після цього цілком відновлювати врожай за оптимального водоспоживання.

В таких моделях кожна попередня фаза розвитку рослин впливає на зростання і розвиток у наступній фазі [2].

Фізіологічні обмеження виражені тим, що для культур першого типу рівняння має вигляд добутку функцій окремих періодів:

$$\frac{y}{y^p(\theta)} = f_1(W_1) \cdot f_2(W_2) \cdot \dots \cdot f_n(W_n), \quad (2)$$

для другого типу - суми функцій окремих періодів:

$$\frac{y}{y^p(\theta)} = f_1(W_1) + f_2(W_2) + \dots + f_n(W_n), \quad (3)$$

де  $f_i(W_i)$  - функція, яка відповідає питомому (відносно одиниці) зниженню врожаю при зниженні відносно критичного значення  $W_i^{cr}$  вологості ґрунту  $W_i$ .

Для важких ґрунтів  $W_i^{cr} = 80\%$  від найменшої вологоємності. Для інших типів ґрунтів необхідно замість фактичної вологості  $W_i$  підставляти вираз

$$W_i + d_i,$$

де  $d_i = W_{crh}^i - W_{cr}^i$  - поправочний коефіцієнт  $i$ -ої фази розвитку,  $W_{crh}^i$ ,  $W_{cr}^i$  - відповідно критична вологість важких ґрунтів і ґрунтів розглядуваного в моделі типу.

Для моделей другого типу (таких, як люцерна, трави) зниження врожаю внаслідок недополиву у попередній фазі (періоді) не впливає на врожайність у наступній фазі розвитку сільськогосподарських рослин, що зумовлено їхньою структурою.

Динаміку формування врожаю на основі рівняння (1) можна подати у вигляді системи рівнянь блокового типу:

$$y_i^p = f_i(W_i) \cdot y_{i-1}^p(\theta), \quad i \in [1, n], \quad (4)$$

в якій вплив дефіциту вологості у кожній  $(i-1)$ -й фазі поширюється на  $i$ -ту фазу через  $y_{i-1}^p(\theta)$ . Очевидно, що справджується таке співвідношення:

$$y_0^p(\theta) \geq y_1^p(\theta) \geq y_2^p(\theta) \geq \dots \geq y_n^p(\theta).$$

Причому рівність  $y_i^p(\theta) = y_1^p(\theta)$  досягається у тому разі, якщо протягом  $i$ -ої фази вологість ґрунту

не знижувалася за критичну межу  $W_i^{cr}$ , тобто  $f_i(W_i) = 1$ .

**Метою статті** є застосування інтелектуальних методів підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур для економії водних та енергетичних ресурсів з одночасним забезпеченням отримання планового врожаю.

### Основна частина

Відповідно до [1], математичну модель «відносна врожайність - динаміка вологості ґрунту» для багаторічних трав представимо у вигляді:

$$\frac{y}{y^p(\theta)} = f_1(W_1) \cdot f_2(W_2) \cdot f_3(W_3) \cdot f_4(W_4), \quad (5)$$

$$f_i(W_i) = 0,01 \cdot (A_i W_i^3 + B_i W_i^2 + C_i W_i + D_i), \quad (6)$$

де  $W_i$  - середня вологість кореневмісного шару ґрунту у фазі  $i$  в % від повної вологості;  $A_i, B_i, C_i, D_i$  - емпіричні коефіцієнти, значення яких наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення емпіричних коефіцієнтів у рівнянні (5)

Культура	Міжфазний період	Коефіцієнти			
		A	B	C	D
Багаторічні трави	<b>Пісок</b>				
	1	1.27*10 <sup>-3</sup>	-0.307	23.29	-460.43
	2	2.05*10 <sup>-3</sup>	-0.485	36.50	-786.07
	3	2.06*10 <sup>-3</sup>	-0.511	40.53	-941.10
	4	1.38*10 <sup>-3</sup>	-0.306	21.78	-400.55
Багаторічні трави	<b>Супісь</b>				
	1	1.27*10 <sup>-3</sup>	-0.337	28.43	-666.87
	2	2.05*10 <sup>-3</sup>	-0.540	45.72	-1155.35
	3	2.07*10 <sup>-3</sup>	-0.55	49.07	-1298.65
	4	1.38*10 <sup>-3</sup>	-0.339	26.94	-595.17
Багаторічні трави	<b>Суглинок середній</b>				
	1	1.27*10 <sup>-3</sup>	-0.348	30.49	-755.27
	2	2.06*10 <sup>-3</sup>	-0.554	47.98	-1250.39
	3	2.06*10 <sup>-3</sup>	-0.573	51.39	-1400.29
	4	1.38*10 <sup>-3</sup>	-0.347	28.29	-650.01
Багаторічні трави	<b>Торф</b>				
	1	1.27*10 <sup>-3</sup>	-0.348	29.78	-724.95
	2	2.05*10 <sup>-3</sup>	-0.554	49.03	-1297.65
	3	2.06*10 <sup>-3</sup>	-0.573	52.54	-1452.11
	4	1.38*10 <sup>-3</sup>	-0.347	29.06	-658.94

Для економії водних та енергетичних ресурсів при прийнятті кінцевого рішення про значення рівня ґрунтових вод (РГВ) пропонується враховувати витрати на зміну РГВ та значення очікуваної врожайності. При цьому шукане значення рівня ґрунтових вод буде належати відрізка

$$L_i \in [L_{curr}, L_{task}],$$

де  $L_{curr}$  - поточне значення рівня ґрунтових вод,  $L_{task}$  - завдання, розраховане нео-фаззі регулятором:

$$L_{task, k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k-1}, L_k, W_{k+1}^h),$$

де  $NN(\ )$  - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею;  $k$  - поточний крок, а входними

параметрами є такі: кількість опадів  $P$  (мм), дефіцит вологості повітря  $D$  (мбар), рівень ґрунтових вод  $L$  від світлової поверхні (м), всмоктуючий тиск  $W^h$  (м) у визначеному шарі ґрунту  $h$ .

Розіб'ємо відрізок  $[L_{curr}, L_{task}]$  на рівні частини.

Для кожного значення РГВ визначимо вологість ґрунту, витрати на зміну РГВ до даного значення та відносну врожайність.

Всмоктуючий тиск ґрунту визначатиметься за навченою нео-фаззі моделлю об'єкта керування:

$$W_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k+1}, W_{k-1}^h, W_k^h),$$

де  $NN(\ )$  - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею;  $k$  - поточний крок, а вхідними параметрами є такі: кількість опадів  $P$  (мм), дефіцит вологості повітря  $D$  (мбар), рівень ґрунтових вод  $L$  від світлової поверхні (м).

Для переведення значення всмоктуючого тиску у відносну вологість скористаємося основною гідрофізичною характеристикою для даного типу ґрунту. Відносну врожайність на кожній фазі розвитку рослин визначатимемо за моделями (2) або (3), а у випадку багаторічних трав - за моделлю (6) з емпіричними коефіцієнтами з табл. 1. В результаті отримаємо множину можливих рішень визначення необхідного рівня ґрунтових вод (табл. 2).

Таблиця 2 – Множина можливих рішень визначення необхідного РГВ

Рішення $X_i \in X$	РГВ $L_i \in [L_{curr}, L_{task}]$	Вологість (всмоктуючий тиск) ґрунту $W_i$	Витрати на зміну РГВ $k_{1,i}$	Відносна врожайність на $i$ -й фазі $k_{2,i} = f_i(W_i)$
$x_0$	$L_0$	$W_0$	$k_{1,0}$	$k_{2,0}$
$x_1$	$L_1$	$W_1$	$k_{1,1}$	$k_{2,1}$
$x_2$	$L_2$	$W_2$	$k_{1,2}$	$k_{2,2}$
...	...	...	...	...
$x_n$	$L_n$	$W_n$	$k_{1,n}$	$k_{2,n}$

Область допустимих рішень має такий вигляд:

$$X = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}.$$

Кожне рішення характеризується двома критеріями - витратами на зміну РГВ та відносною врожайністю:

$$K = \{k_1, k_2\}.$$

Застосувавши один з методів підтримки прийняття рішення в умовах багатокритеріальності [3-10] (принцип головного критерію, функціонально-вартісний аналіз, принцип послідовної оптимізації, схема максимальної загальної корисності, схема максимуму), визначаємо, який РГВ необхідно встановити в системі, з врахуванням фінансових витрат та очікуваної врожайності [11, 12].

Наприклад, при застосуванні принципу головного критерію, визначаємо, який критерій є головним. Тоді другий критерій виступає у ролі обмеження.

Так, якщо головним критерієм є витрати на зміну рівня ґрунтових вод, то відносна врожайність виступає у ролі обмеження:

$$k_{2, \min} \leq k_2 \leq 1.$$

Сформуємо область допустимих рішень  $X^*$ , яка задовольняє заданим обмеженням. Тоді найкращим рішенням є таке:

$$x = \arg \min_{x \in X^*} k_1.$$

### Висновки

В роботі застосовано інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур. Даний підхід дозволяє економити водні та енергетичні ресурси при керуванні вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур без втрат врожайності.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Лазарчук М.О. Основи гідромеліорацій. Осушення земель. / М.О. Лазарчук. - Рівне: НУВГП, 2006. - 300 с.
- Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. - Москва: Горячая линия - Телеком, 2003. - 93 с.
- Mohammed, A. S. Optimal Forecast Model for Erbil Traffic Road Data. ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences. 2017. Vol. 29, No 5. P. 137–145. DOI: <https://doi.org/10.21271/ZJPAS.29.5.15>
- Коваленко А. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування / А. А. Коваленко, Г. А. Кучук // Сучасні інформаційні системи. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
- Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускну здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. Сучасні інформаційні системи. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>

6. Gomathi B, Karthikeyan N K, Saravana Balaji B, "Epsilon-Fuzzy Dominance Sort Based Composite Discrete Artificial Bee Colony optimization for Multi-Objective Cloud Task Scheduling Problem", International Journal of Business Intelligence and Data Mining, Volume 13, Issue 1-3, 2018, pages 247-266, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJBIDM.2018.088435>
7. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НІУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209–213.
8. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. Studies in Systems, Decision and Control, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
9. Amin Salih Mohammed, Saravana Balaji B., Niwa Abdulkarim Mawlood. Conceptual analysis of Iris Recognition Systems. Advanced Information Systems. 2019. Vol. 3, No. 2. P. 86-90. DOI : <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.15>
10. Кучук Г. А. Метод параметрического управления передачей данных для модификации транспортных протоколов беспроводных сетей / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
11. Grebennik I.V. Interval estimation of alternatives in decision-making problems / I.V. Grebennik, T.E. Romanova, S.B. Shek-hovtsov // Cybernetics and Systems Analysis, 45(2), 2009. - P. 253-262.
12. Гребеннік І.В. Методи прийняття рішень / О.Г. Наконечний, І.В. Гребеннік, Т.Є. Романова, А.Д. Тевяшев. - Харків: ХНУРЕ, 2016. - 132 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. О.В. Шефер,  
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.  
Received (Надійшла) 10.07.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

### Оптимизация энергетических затрат и расходов воды в автоматизированной системе управления влажностью сельскохозяйственных культур

Л. И. Леви

Целью управления водным режимом почвы является получение планового урожая сельскохозяйственных культур. Современные методы расчета оросительных систем и управления ими требуют использования количественных связей между водным режимом почвы и урожайности культур. Существуют подходы по связыванию урожайности с суммарным испарением, коэффициентом влагообеспеченности, осадками, количеством дней, в которые растения почувствуют водный стресс. Самыми совершенными являются динамические модели формирования урожая, в которых учитываются все основные факторы жизнедеятельности растений. Они инвариантны, но для их практического применения необходимо определять большое количество недостаточно изученных в настоящее время факторов внешней среды и физиологии растений, изменяющихся во времени по видам и сортам растений. По физиологическим свойствам различают два типа культур. К первому типу относятся культуры, имеющие ярко выраженные критические периоды, например, зерновые, для которых недостаточное водоснабжение во время цветения имеет необратимое пагубное влияние на объем урожая; ко второму - культуры, например, травы, которые могут переносить подсушивание почвы в течение небольшого периода и после этого полностью восстанавливать урожай при оптимальном водопотреблении. В таких моделях каждая предыдущая фаза развития растений влияет на рост и развитие в следующей фазе. В работе применены интеллектуальные методы поддержки принятия решений в условиях многокритериальности в задачах оптимального управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур. Данный подход позволяет экономить водные и энергетические ресурсы при управлении влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур без потерь урожайности.

**Ключевые слова:** интеллектуальные методы поддержки принятия решений, оптимальное управление влагообеспеченностью, многокритериальность, нео-фаззи модель объекта управления, принцип главного критерия, схема максимина.

### Optimization of energy costs and water consumption in an automated system for managing moisture supply of agricultural crops

L. Lievi

The purpose of soil water management is to obtain a planned crop yield. Modern methods for the calculation and management of irrigation systems require the use of quantitative links between the soil water regime and crop yields. There are approaches for tying yields with total evaporation, moisture supply ratio, precipitation, the number of days in which plants will experience water stress. The most perfect are dynamic models of crop formation, which take into account all the main factors of plant activity. They are invariant, but for their practical application it is necessary to determine a large number of environmental factors and plant physiology, which are currently not enough studied, varying with time in species and varieties of plants. According to physiological properties, there are two types of cultures. The most perfect are dynamic models of crop formation, which take into account all the main factors of plant activity. They are invariant, but for their practical application it is necessary to determine a large number of environmental factors and plant physiology, which are currently not enough studied, varying with time in species and varieties of plants. According to physiological properties, there are two types of cultures. The first type includes crops that have pronounced critical periods, for example, cereals, for which insufficient water supply during flowering has an irreversible detrimental effect on crop yield; to the second, crops, for example, herbs that can tolerate drying of the soil for a short period and then completely restore the crop with optimal water consumption. In such models, each previous phase of plant development influences growth and development in the next phase. Intellectual methods of decision-making support in the conditions of multicriteriality in the tasks of optimal control of moisture supply of agricultural crops are applied. This approach allows to save water and energy resources while managing the moisture supply of agricultural crops without loss of yield.

**Keywords:** intelligent decision-making support methods, optimal control of moisture security, multicriteriality, neo-fuzzy model of the control object, principle of the main criterion, maximin scheme.

О. А. Макогон<sup>1</sup>, Д. В. Васиденко<sup>1</sup>, І. С. Базилевський<sup>1</sup>,  
М. Д. Ткаченко<sup>2</sup>, О. С. Онопрієнко<sup>2</sup>, Р. В. Волобуєв<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Військовий інститут танкових військ НТУ “ХПІ”, Харків, Україна

<sup>2</sup> Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

## ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ АЛГЕБРИ ЛОГІКИ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДПУСКОВОГО КОНТРОЛЮ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

**Предметом** вивчення в статті процес підготовки до пуску та електропуск танкових двигунів у різних умовах експлуатації. **Метою дослідження** є розроблення та технічна реалізація алгоритму передпускового контролю системи електропуску двигунів внутрішнього згоряння об'єктів бронетанкового озброєння ті техніки (БТОТ). **Задачі:** Провести аналіз систем електричного пуску (СЕП) танкових двигунів та передпускового контролю двигуна, визначити основні відмови елементів системи електричного пуску танкового двигуна, причини їх виникнення, способи усунення та сформувати простір контролюємих передпускових параметрів, за функціонально-логічною моделлю системи електропуску танкового двигуна як об'єкта діагностування визначити послідовність операцій підготовки до пуску та пуску двигуна, скласти мінімізовану таблицю функцій несправності та на її основі розробити алгоритм передпускового контролю двигунів об'єктів БТОТ. Використовуваними є загальнонаукові та спеціальні методи наукового пізнання. Отримані такі **результати**. На основі системного аналізу було проведена оцінка ефективності використання принципових (монтажних) схем для пошуку несправностей в системі електричного пуску танкових двигунів. За допомогою структурно-функціонального методу та формалізації основних несправностей та відмов в системі електропуску двигуна була створена діагностична модель та визначена необхідно достатня глибина прогнозу. З використанням математичного апарату алгебри логіки була складана таблиця функцій відмов несправності (ТФН) з подальшим перетворення її в мінімізовану таблицю функцій несправності (МТФН), на основі був побудований алгоритм передпускового контролю двигунів об'єктів БТОТ та алгоритм пошуку відмов системи електропуску сучасних танків. **Висновки.** Системи електричного пуску, які є складовою частиною танка, безпосередньо впливають на формування бойових властивостей об'єктів БТОТ. Їх склад та структура визначаються задачами забезпечення та здійснення пуску двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), особливо в умовах низьких температур. У зв'язку зі стрімким розвитком систем електрообладнання значно ускладнилося й питання організації та технології ремонту бронетанкової техніки, особливо у польових умовах. Досвід експлуатації БТОТ показує, що довговічність і безаварійність двигунів і стартерних акумуляторних батарей багато в чому залежить від якості підготовки до пуску і пуску двигунів в різних умовах. При цьому численні випадки пуску двигуна без достатньої кількості охолоджувальної рідини і моторного масла, особливо в періоди екстрених виходах машини, а також випадки передчасного розряду акумуляторних батарей (АБ) через неточне дотримання режиму пуску двигуна. Запропонований алгоритм може бути використаний як ремонтними підрозділами так і безпосередньо танковими екіпажами для скорочення часу на відновлення працездатності системи електропуску танкових двигунів.

**Ключові слова:** система електропуску двигуна, передпусковий контроль, алгоритм діагностування, двигун внутрішнього згоряння, пошук несправностей, мінімізована таблиця функцій відмов.

### Вступ

**Постановка проблеми та завдання дослідження.** Важливою проблемою ефективного застосування сучасних танків є підвищення надійності пуску двигуна, довговічності і безаварійності двигуна і стартерних акумуляторних батарей, особливо під час експлуатації в польових умовах.

Одним із пріоритетних аспектів розвитку складних електротехнічних систем є підвищення якості підготовки до пуску і пуску двигунів в різних умовах експлуатації. Отже, актуальність роботи обумовлюється тим, що внаслідок достатнього ускладнення схемних і конструктивних рішень система електрообладнання має недостатню захищеність від порушень технології підготовки до пуску і режиму пуску двигуна з боку членів екіпажу танка. Використання при перевірці апаратури для знімання і опрацювання діагностичної інформації, яка подається на інформаційно-індикаторне табло по ходу логічної роботи системи, дозволяє скоротити час на перевірку систем електропостачання бойових машин. Але відсутність цієї апаратури є підґрунтям пошуку но-

вих науково-технічних рішень для здійснення автоматизованого передпускового контролю ДВЗ.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Досвід експлуатації танків показує, що довговічність і безаварійність двигунів і стартерних акумуляторних батарей багато в чому залежить від якості підготовки до пуску і пуску двигунів в різних умовах. При цьому численні випадки пуску двигуна без достатньої кількості охолоджувальної рідини і моторного масла, особливо в періоди екстрених виходах машини, а також випадки передчасного розряду акумуляторних батарей (АБ) через неточне дотримання режиму пуску двигуна.

Правила передпускового контролю і пуску двигунів різних умовах експлуатації встановлюються нормативно-технічною документацією на кожен об'єкт бронетанкового озброєння і техніки. Цими правилами передбачається обов'язкова перевірка наявності та рівня масла і охолоджуючої рідини в системах силової установки танка, оцінка ступеня розрядженого стартерних АБ, оцінка відповідності температури масла і охолоджуючої рідини рекомендованим значенням з урахуванням температури на-

вколишнього середовища, а також суворе дотримання режиму пуску двигуна: тривалість роботи стартера не більше 8с, перерви між повторними включеннями стартера не менше 15с, перерва між циклами пуску (кожен не більше трьох включень стартера) не менше 15 хв. [1-3].

Практика показує, що освоєння передпускового контролю танків і БМП як одне із найважливіших питань щодо підтримання високої боєздатності цих машин неможливе без якісного аналізу систем електричного пуску танкових двигунів поелементно та в цілому [4-8].

Аналіз основних відмов і бойових пошкоджень, що виникають при дії факторів різного роду, дозволяє зробити такий висновок, що недоліком принципів (монтажних) схем є те, що в них відображаються не логічні зв'язки між елементами діагностування, а функціональні зв'язки і склад комплектуючих елементів. При значній кількості елементів в системі та виникненні в ній відмов важко виділити логічні зв'язки між елементами схеми та безпосередні причини, що їх викликають. При експлуатації танків, особливо при обмеженнях часу на підготовку танків до руху (найчастіше в зимових умовах) проведення діагностування відмов, що виникають при передпусковій підготовці та пуску двигуна, занадто ускладнено. Через це до 20% нових двигунів і до 30% стартерних АБ не відпрацьовують призначеного ресурсу [9]. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку нових науково-технічних підходів щодо складання алгоритмів передпускового контролю та діагностики системи електропуску двигуна.

**Метою роботи** є розроблення та технічна реалізація алгоритму передпускового контролю системи електропуску танкових двигунів. Рішення поставленого завдання досягається тим, що пуск двигуна здійснюється тільки після опитування датчиків рівня охолоджуючої рідини і моторного масла, датчиків температури і тиску масла двигуна, та зіставлення їх показників з необхідними шляхом автоматичного виконання встановленої послідовності операцій підготовки до пуску і режиму пуску танкового двигуна комбінованим способом. Так, **завдання дослідження** такі: провести аналіз систем електричного пуску танкових двигунів та передпускового контролю двигуна, визначити основні відмови елементів системи електричного пуску танкового двигуна, причини їх виникнення, способи усунення та сформулювати простір контролюємих передпускових параметрів, за функціонально-логічною моделлю системи електропуску танкового двигуна як об'єкта діагностування визначити послідовність операцій підготовки до пуску та пуску двигуна, скласти мінімізовану таблицю функцій несправності та на її основі розробити алгоритм передпускового контролю двигунів об'єктів БТОТ.

## Виклад основного матеріалу

**1. Система електропуску танкового двигуна як об'єкт діагностування.** Конструктивне забезпечення автоматизації процесів передпускового контролю і пуску танкового двигуна є важливою війсь-

ково-технічним завданням, рішення якого дозволить значно зменшити вплив рівня кваліфікації членів екіпажу танка на довговічність і безаварійність його силової установки і стартерних акумуляторних батарей. Для цього пропонується визначити основні відмови елементів системи електричного пуску, причини їх виникнення, способи усунення та сформувати простір контролюємих параметрів. При побудованні діагностичної моделі не враховувалися такі деталі як конструкція, маса, габаритні розміри елементів системи електропуску танка та фізичні параметри вхідних впливів й вихідних реакцій. Усі несправності вважалися однократними. Також було зроблено припущення, що ймовірність появи в системі поодиноких дефектів значно вища за ймовірність одночасної появи двох і більше дефектів.

Вирішення поставлених завдань досягається тим, що пуск ДВЗ здійснюється тільки після автоматичного контролю рівня охолоджуючої рідини і моторного масла, температури і тиску масла двигуна і зіставлення їх показників з необхідними. У зв'язку з цим до складу системи автоматизованого передпускового контролю двигуна пропонується включити датчики температури масла двигуна, датчик рівня охолоджуючої рідини, датчик рівня масла двигуна, датчик тиску масла двигуна.

**2. Використання таблиць функцій несправності для програмної реалізації алгоритму діагностики СЕП танків.** У якості універсальної математичної моделі для синтезу алгоритму автоматизованого передпускового контролю та діагностування відмов у СЕП двигуна пропонується використовувати таблицю функцій несправності (ТФН), в якій стовпці відповідають допустимим елементарним перевіркам (діагностичним параметрам), а рядки - технічним станам об'єкта діагностування (ОД) [9].

У рядках таблиці вказують всі можливі перевірки  $Z_i$ , які можуть бути використані в процедурі діагностування. Стовпці таблиці відповідають справному  $S_0$  і всім можливим несправним станам  $S_1, S_2, \dots, S_k$ . Кожний несправний стан відповідає одній несправності (одиначної або кратної) із заданого класу несправностей, щодо якого будується тест. На перетині  $i$ -ого стовбця та  $j$ -ого рядка проставляється результат  $R_i^j$ -ої перевірки для системи, що знаходиться в  $i$ -му стані. Кожний рядок таблиці є двійковий код стану моделі при відмові відповідного елемента. Двійкові коди рядків не співпадають один з одним, тобто всі одиначні відмови мають відмінність на повному наборі вихідних параметрів.

Кожен рядок ТФН відповідає одній елементарній перевірці і позначається символом цієї перевірки. Вважається, що кожному елементу ОД відповідає одна перевірка. Кожний стовпець ТФН відповідає одному технічному стану. ТФН містить кількість стовпців, яка дорівнює кількості елементів ОД плюс одиниця. Для цього використовують закони булевої алгебри:

У випадку, якщо є один стовпець, або декілька однакових стовпців, такий стовпець закреслюється, а стовпець несправного стану ТФН, що залишається, замінюється стовпцем деякого еквівалентного ста-

ну. Якщо виявиться, що в мінімізованій матриці двійкові коди деяких рядків співпадають, то таку вкорочену матрицю треба доповнити мінімально необхідним числом параметрів, щоб всі рядки відрізнялися.

**2 Множина елементарних перевірок та глибина пошуку відмов.** За функціонально-логічною моделлю системи електропуску як об'єкта діагностування була визначена множина елементарних перевірок та глибина пошуку відмов (рис. 1).

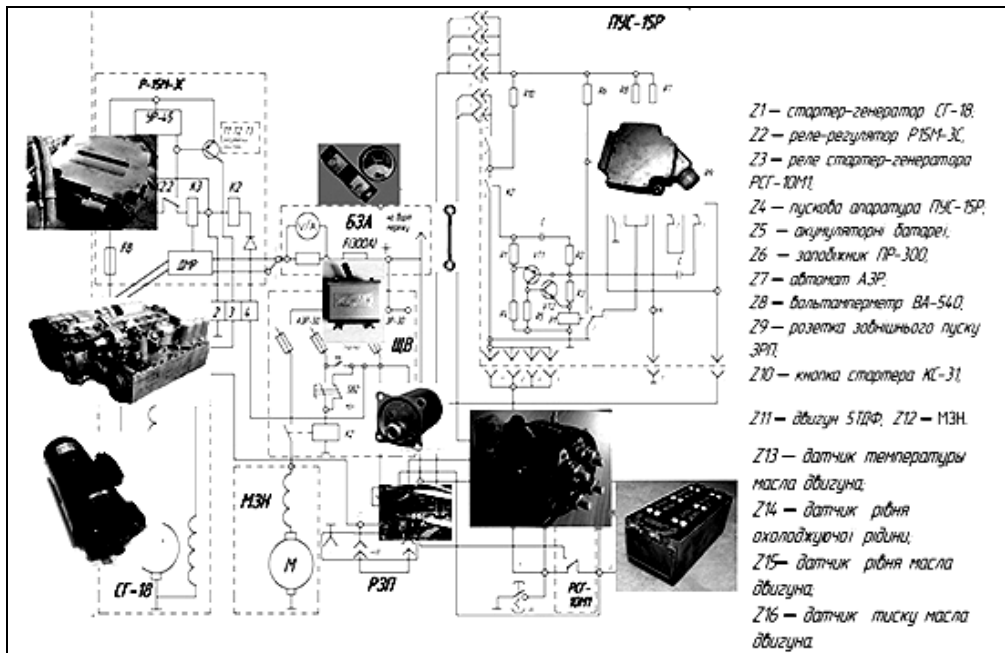


Рис. 1. Система електропуску танкового двигуна як об'єкт діагностування

Кожний елемент діагностування може знаходитися в двох станах – працездатному або непрацездатному. Працездатному стану поставимо у відповідність значення “1”, а непрацездатному – “0”.

Запишемо множину елементів  $Z = \{z_1, \dots, z_n\}$ , кожний елемент якої визначає елементи моделі діагностування.

- $Z_1$  – стартер-генератор СГ-18;
- $Z_2$  – реле-регулятор Р15М-3С;
- $Z_3$  – реле стартер-генератора РСГ-10М1;
- $Z_4$  – пускова апаратура ПУС-15Р;
- $Z_5$  – акумуляторні батареї;
- $Z_6$  – запобіжник ПР-300;
- $Z_7$  – автомат АЗР;
- $Z_8$  – вольтметр ВА-540;
- $Z_9$  – розетка зовнішнього пуску ЗРП;
- $Z_{10}$  – кнопка стартера КС-31;

Крім того, до переліку елементів таблиці функцій несправності вводимо елементи, які задіяні у процесі пуску двигуна:

- $Z_{11}$  – двигун 5ТДФ.
- $Z_{12}$  – МЗН.

Для організації автоматизованого передпускового контролю двигуна передбачається включення до переліку

За аналогією пропонується організація опитування датчиків.

- $Z_{13}$  – датчик температури масла двигуна;
- $Z_{14}$  – датчик рівня охолоджуючої рідини;
- $Z_{15}$  – датчик рівня масла двигуна;
- $Z_{16}$  – датчик тиску масла двигуна.

Результати опитування теж пропонується подавати у бінарному вигляді. Неприпустимо низькому

значенню контролюємого параметра відповідає логічне значення. Таким чином, кількість рядків у таблиці буде дорівнювати  $n=16$ .

Кількість стовбців у таблиці буде визначатися роботою системи за функціональною схемою і дорівнювати  $m=16+1=17$ . Множина технічних станів, яка була визначена з урахуванням режимів роботи системи електропуску та особливостей експлуатації бойових машин в сучасних умовах, наведена у табл. 1.

**3. Мінімізована таблиця функцій несправності системи електропуску танка.** Аналіз даних таблиці 1 дає змогу провести її оптимізацію шляхом спрощення значень результатів діагностування.

Якщо при пуску двигуна хоча б на одному з датчиків немає одиничного сигналу, що свідчить про неприпустимо низьке значення параметру, контролюємого датчиком, пуск двигателя не відбувається, а МЗН відключається. Для оптимізації отриманої табл. 1 пропонується здійснити за допомогою формул булевої алгебри [10, 11]:

$$1 \vee 1 \vee 0 \vee 1 = 0; \quad (1)$$

$$1 \vee 0 \vee 1 \vee 1 = 0 \quad (2)$$

$$0 \vee 1 \vee 1 \vee 1 = 0 \quad (3)$$

$$0 \vee 1 \vee 1 \vee 1 = 0, \quad (4)$$

Формули (1)-(4) є формалізацією формування сигналу у випадках невідповідності контрольованих показників необхідним їх значенням.

Після перетворень та спрощень отримуємо мінімізовану таблицю функцій несправності системи електропуску танка (табл. 2).

Таблиця 1 – Таблиця функцій несправності СЕП танкового двигуна

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{15}$	$S_{16}$	$S_{17}$
$Z_1$	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
$Z_2$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
$Z_3$	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
$Z_4$	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0
$Z_5$	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
$Z_6$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
$Z_7$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$Z_8$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
$Z_9$	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
$Z_{10}$	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
$Z_{11}$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
$Z_{12}$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
$Z_{13}$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
$Z_{14}$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
$Z_{15}$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
$Z_{16}$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0

Таблиця 2 – Мінімізована таблиця функцій несправності СЕП танкового двигуна

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$
$Z_1$	0	0	0	0	0	1	1	0
$Z_2$	1	1	1	1	1	1	1	0
$Z_3$	0	0	0	1	1	1	1	1
$Z_4$	0	0	1	1	1	1	0	1
$Z_5$	0	0	0	0	1	1	1	1
$Z_6$	0	0	0	0	0	1	1	1
$Z_7$	0	0	0	0	1	0	1	1
$Z_8$	1	0	0	0	1	0	0	0
$Z_9$	0	1	0	0	0	1	0	0
$Z_{10}$	0	0	1	0	0	1	1	0
$Z_{11}$	0	0	0	1	1	0	1	1

Мінімізована таблиця функцій несправності дозволяє:

- визначити мінімальну сукупність діагностичних параметрів для перевірки працездатності системи;
- організувати пошук несправності комбінаційною методом;
- скласти алгоритм передпускової підготовки в системі послідовним методом і шляхом поєднання комбінаційного і послідовного методів по гнучкій програмі;
- визначити мінімальні приватні набори діагностичних параметрів для перевірки працездатності окремих функціональних елементів системи;
- побудувати дешифратор технічного стану системи для пристрою автоматичного контролю, пошуку несправностей та здійснення автоматизованого передпускового контролю двигуна.

Як бачимо, мінімізована таблиця функцій несправності має меншу кількість рядків та стовбців ніж вихідна: завдяки використанню апарату булевої алгебри число рядків таблиці скоротилося до 11, а число стовбців – до 12.

Переобозначимо елементи автоматизованої системи передпускового контролю двигуна таким чином:

- $Z_1$  – стартер-генератор СГ-18;
- $Z_2$  – реле стартер-генератора РСГ-10;
- $Z_3$  – пускова апаратура ПУС-15Р;
- $Z_4$  – акумуляторні батареї;
- $Z_5$  – кнопка стартера КС-31;
- $Z_6$  – двигун 5ТДФ;
- $Z_7$  – МЗН;
- $Z_8$  – датчик температури масла двигуна;
- $Z_9$  – датчик рівня охолоджуючої рідини;
- $Z_{10}$  – датчик рівня масла двигуна;
- $Z_{11}$  – датчик тиску масла двигуна.

Глибина прогнозу цієї таблиці невелика, але достатня для побудовання алгоритму автоматизованого передпускового контролю системи електропуску двигуна.

Крім того, ця таблиця може бути використана для побудовання алгоритму пошуку несправностей у системі електропуску танкового двигуна.

#### 4. Реалізація алгоритму передпускового контролю двигунів об'єктів БТОТ та алгоритм пошуку відмов.

Результати МТФН пропонується використовувати для побудови алгоритму передпускового контролю двигунів об'єктів БТОТ та пошуку відмов.

Для практичної реалізації визначеної за МТФН логікою роботи до систему електричного пуску двигуна внутрішнього згорання додатково вводяться:

- блок управління режимом роботи маслозакачуючого насоса (МЗН);
- блок управління режимом роботи акумуляторних батарей;
- блок захисту двигуна від порушення технології підготовки пуску, що складається з чотирьох датчиків:

- (рівня охолоджуючої рідини і масла, температури і тиску масла).

Схематично ці елементи показано на рис. 2.



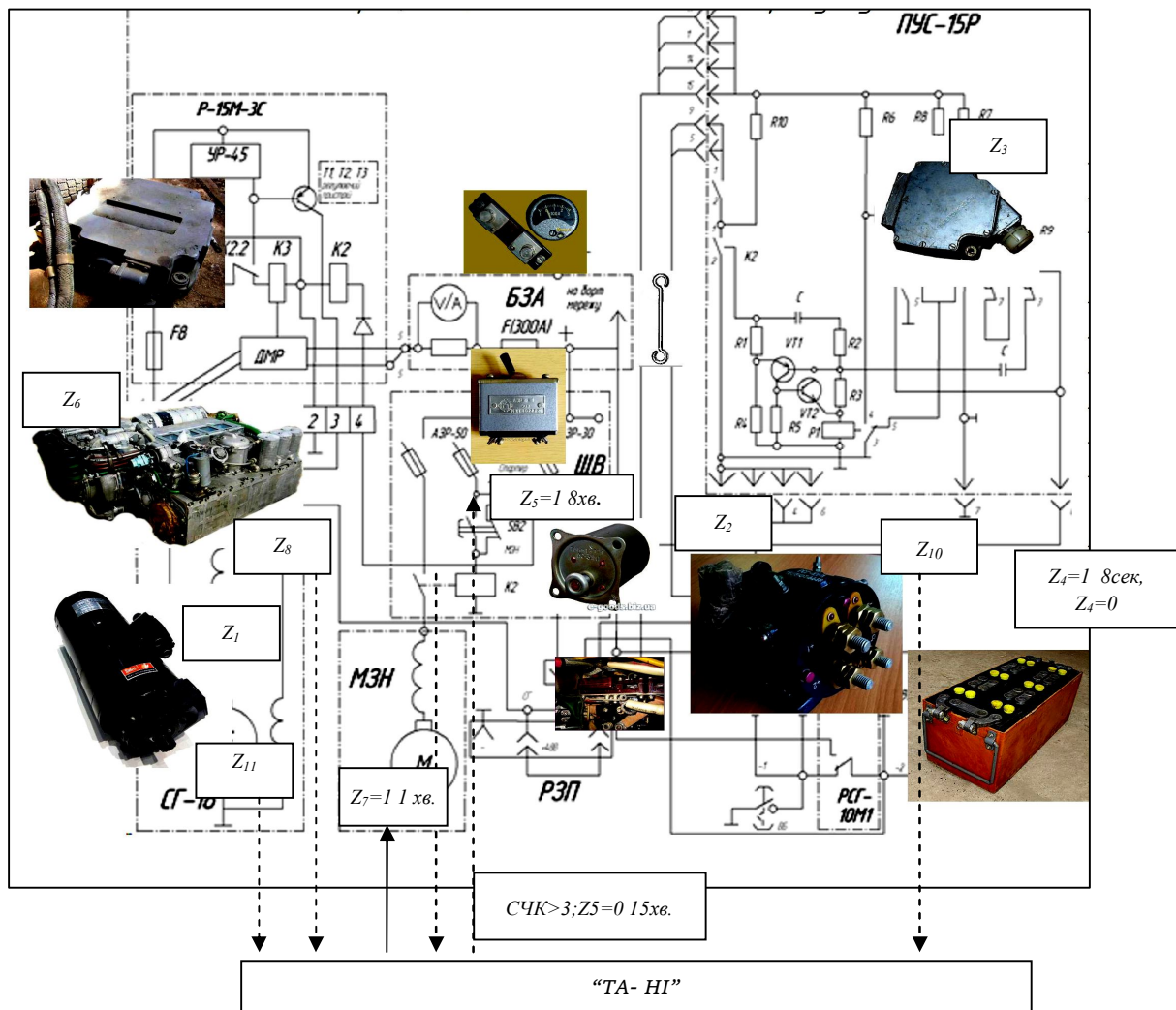


Рис. 2. Функціонально-логічна модель системи передпускового контролю ДВЗ

У початковий стан система запуску двигуна приводиться включенням вимикача батарей. Система починає працювати при включенні кнопки "Стартер". При виявленні відмов окремих вузлів системи електропускудвигуна або невідповідності контролюємих параметрів мінімально припустимим значенням пуск двигуна не відбувається, МЗН після 1 хв. роботи відключається. Кожна спроба пуску двигуна реєструється лічильником пусків (СЧК).

Після трьох включень стартер-генератора протягом 15 хв. при натисканні на кнопку "Стартер" система не працює.

Інформація дублюється на інформаційно-індикаторному табло механіка-водія для прийняття рішення по усуненню нестравностей.

За цим сигналом механік-водій оцінює показання приладів на щитку механіка-водія, з'ясує причину незапуску двигуна, вживає заходів до її усунення і здійснює повторний пуск.

Згідно запропонованої схеми вироблення управляючого сигналу відбувається у дешифраторі технічного стану системи автоматичного контролю та подається на електромагнітні клапани здійснюється за допомогою силових польових транзисторів.

Блок живлення має у складі імпульсний перетворювач напруги. Поточні значення контролюємих

параметрів відображаються на крупних семі сегментних індикаторах. Корпус захищений від попадання бризг та пилу.

Для апаратної реалізації алгоритму пропонується використання 32-х разрядного мікроконтролера PIC32 компанії Microchip [12].

Hardware блока управління дозволяє використовувати його при температурі від  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ .

Крім плати управління передбачено використання плати індикації. Варіант реалізації інформаційно-індикаторного табло механіка-водія на базі 32-х разрядного мікроконтролера PIC32 компанії Microchip показано на рис. 3.

### Висновки

1. Системи електричного пуску, які є складовою частиною танка, безпосередньо впливають на формування бойових властивостей об'єктів бронетанкового озброєння ті техніки. Їх склад та структура визначаються задачами забезпечення та здійснення пуску двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), особливо в умовах низьких температур.

У зв'язку зі стрімким розвитком систем електрообладнання значно ускладнилося й питання організації та технології ремонту бронетанкової техніки, особливо у польових умовах.

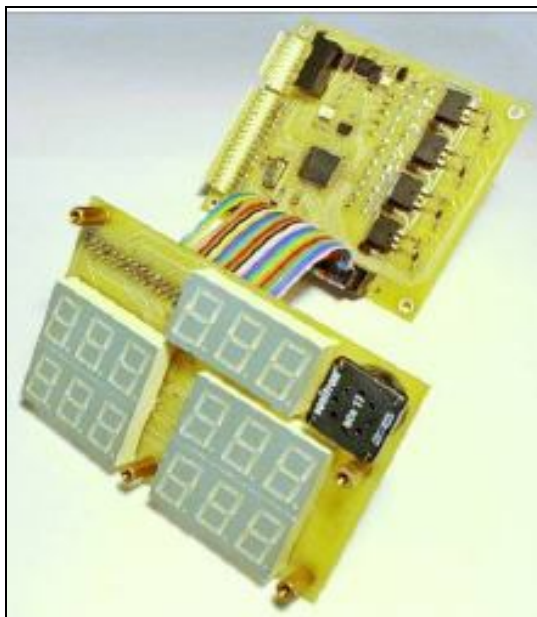


Рис. 3. Інформаційно-індикаторне табло механіка-водія

2. Досвід експлуатації танків показує, що довговічність і безаварійність двигунів і стартерних акумуляторних батарей багато в чому залежить від якості підготовки до пуску і пуск двигунів в різних умовах. При цьому численні випадки пуску двигуна без достатньої кількості охолоджувальної рідини і моторного масла, особливо в періоди екстрених виходах машини, а також випадки передчасного розряду акумуляторних батарей (АБ) через неточне дотримання режиму пуску двигуна.

Освоєння військового ремонту електрообладнання об'єктів бронетанкового озброєння ті техніки як одне із найважливіших питань щодо підтримання високої боєготовності цих машин неможливе

без якісного аналізу систем електричного пуску танкового двигуна поелементно та в цілому.

3. На основі системного аналізу було проведена оцінка ефективності використання принципів (монтажних) схем для пошуку несправностей в системі електричного пуску танкових двигунів. За допомогою структурно-функціонального методу та формалізації основних несправностей та відмов в системі електропуску двигуна була створена діагностична модель та визначена необхідно достатня глибина прогнозу.

4. З використанням математичного апарату алгебри логіки була складання таблиці функцій відмов несправності (ТФН) з подальшим перетворення її в мінімізовану таблицю функцій несправності (МТФН), на основі був побудований алгоритм передпускового контролю двигунів об'єктів бронетанкового озброєння ті техніки та алгоритм пошуку відмов системи електропуску сучасних танків.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному:

1. Була створена діагностична модель системи електропуску такого двигуна з мінімально необхідною глибиною прогнозу.

2. Використаний математичний апарат алгебри логіки для формалізації несправностей та відмов в системі електропуску танкового двигуна.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні алгоритму передпускового контролю двигунів об'єктів бронетанкового озброєння ті техніки та алгоритм пошуку відмов системи електричного пуску ДВЗ.

Даний алгоритм може бути використаний як ремонтними підрозділами так і безпосередньо танковими екіпажами для скорочення часу на відновлення працездатності системи електропуску танкових двигунів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Объект 447А(437А). Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Кн. 2 – М.Воениздат, 1985. – 742 с.
2. Системы электрического пуска двигателей объектов БТВТ - Киев, КИСВ, 1993. – 64 с.
3. Стартер - генераторная установка СГ-18., Х. Изд-во ХГвВТУ, 1986. – 31 с.
4. Пат. 2064076 РФ МПК F02N11/08. Устройство пуска танкового двигателя / Кутарев Л. Б., Старостин М. М., Трояновский Б. Ф.; заявитель и патентообладатель Кутарев Л. Б., Старостин М. М., Трояновский Б. Ф. – № 2000131736/09; заявл. 04.08.93; опубл. 20.07.96.– 3 с.
5. Объект 447А, 437А, 434. Пособие по проверке технического состояния и содержания. – М.:Воениздат, 1988. – 136 с.
6. V. Kharchenko, A. Kovalenko, O. Siora, V. Sklyar, "Security assessment of FPGA-based safety-critical systems: US NRC requirements context", *Proceedings of IEEE Information and Digital Technologies Conference (IDT)*, pp. 132-138, July 2015. DOI: <http://doi.org/10.1109/DT.2015.7222963>
7. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
8. Kharchenko, V., Illiashenko, O., Kovalenko, A., Sklyar, V., Boyarchuk, A. Security informed safety assessment of NPP I&C systems: GAP-IMECA technique. *Proc. 22th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE)*, Prague, Republic, 7-11 Jul. 2014, pp. 1-9. doi: <http://doi.org/10.1115/ICONE22-31175>.
9. Minimization of power losses by traction-transportation vehicles at motion over a bearing surface that undergoes deformation / O. Mozhaiv, N. Kuchuk, D. Shvets etc. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies = Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2019. – № 1 (97), Vol 1. – P. 69-74. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156721>
10. Методика обнаружения неисправностей в электрических цепях. Учебное пособие., Х.,1994. – 82 с.
11. Основы технической диагностики / В.В. Карибский, П.П. Пархоменко, Е.С. Соломонян, В.Ф. Халчев. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
12. Документація контролера PIC 32 PIC32MX5XX/6XX/7XX Family Data Sheet (05/09/2001). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviseDoc/61156G.pdf>.

**Использование математического аппарата алгебры логики для разработки автоматизированной системы предпускового контроля двигателя внутреннего сгорания объектов бронетанкового вооружения и военной техники**

О. А. Макогон, Д. В. Василенко, И. С. Базилевский, Н. Д. Ткаченко, А. С. Оноприенко, Р. В. Волобуев

**Предметом** изучения в статье является процесс обмена информацией в локальных сетях учреждений на компьютерах с различными техническими параметрами. **Целью** исследования является разработка и техническая реализация алгоритма предпускового контроля системы электропуска двигателей внутреннего сгорания объектов БТОТ. **Задачи:** Провести анализ систем электрического пуска танковых двигателей и предпускового контроля двигателя, определить основные отказы элементов системы электрического пуска танкового двигателя, причины их возникновения, способы устранения и сформировать пространство контролируемых предпусковых параметров, по функционально-логической модели системы электропуска танкового двигателя как объекта диагностирования; определить последовательность операций подготовки к пуску и пуска двигателя; составить минимизированную таблицу функций неисправности и на ее основе разработать алгоритм предпускового контроля двигателей объектов БТОТ. Використовуваними є загальнонаукові та спеціальні **методи** наукового пізнання. **Получены следующие результаты.** На основе системного анализа была проведена оценка эффективности использования принципиальных (монтажных) схем для поиска неисправностей в системе электрического пуска танковых двигателей. С помощью структурно-функционального метода и формализации основных неисправностей и отказов в системе электропуска двигателя была создана диагностическая модель и определена необходимо достаточная глубина прогноза. С использованием математического аппарата алгебры логики была составлена таблицы функций отказов неисправности (ТФН) с последующим превращение ее в минимизировану таблицу функций неисправности (МТФН), на основе был построен алгоритм предпускового контроля двигателей объектов БТОТ и алгоритм поиска отказов системы электропуска современных танков. **Выводы.** Системы электрического пуска, которые являются составной частью танка, непосредственно влияют на формирование боевых свойств объектов БТОТ. Их состав и структура изначаются задачами обеспечения и осуществления пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС), особенно в условиях низких температур. В связи со стремительным развитием систем электрооборудования значительно усложнилось и вопросы организации и технологии ремонта бронетанковой техники, особенно в полевых условиях. Опыт эксплуатации танков показывает, что долговечность и безаварийность двигателей и стартерных аккумуляторных батарей во многом зависит от качества подготовки к пуску и пуск двигателей в различных условиях. При этом многочисленные случаи пуска двигателя без достаточного количества охлаждающей жидкости и моторного масла, особенно в периоды экстренных выходов машины, а также случаи преждевременного разряда аккумуляторных батарей (АБ) из-за неточного соблюдения режима пуска двигателя. Предложенный алгоритм может быть использован как ремонтными подразделениями и непосредственно танковыми экипажами для сокращения времени на восстановление работоспособности системы электропуска танковых двигателей.

**Ключевые слова:** система электропуска двигателя, предпусковой контроль, алгоритм диагностики, двигатель внутреннего сгорания, поиск неисправностей, минимизирована таблица функций отказов.

**Use of the algebra logic mathematical apparatus for the development of the internal combustion engine armor and military technics units start-up automated control system**

H. Makogon, D. Vasylenko, I. Bazilevskij, M. Tkachenko, O. Onoprienko, R. Volobueff

The **subject matter** of the article is the process of preparation for starting and start-up of tank engines in different operating conditions. The **goal** of the study is the development and technical implementation of the algorithm of pre-start control and start-up of electric ignition system of internal combustion engines of armaments of military techniques units. systems. The **tasks** to be solved are: to analyze the tank electric start engines systems and start-up engine control, to determine the main elements failures of the electric tank engine start-up system, the causes of their occurrence, methods of elimination and to form the space of controlled start-up parameters, by functional-logical model of the tank start-up engine system diagnosis to determine the sequence of preparation operations for start-up and start-up of the engine, to draw up the minimized table of failures functions and on its basis to develop algorithm of pre-control engines of armored and military technics units. General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used. The following **results** are obtained. On the basis of the **systematic analysis**, the efficiency of the use of circuit diagrams for troubleshooting the electrical start-up of tank engines was evaluated. Using **the structural-functional method** and formalization of the main faults and failures in the engine start-up system, a diagnostic model was created and sufficient depth of forecast was determined. Using mathematical apparatus of algebra of logic was drawing up of table of failures functions (TFF) with the subsequent transformation of it into the minimized table of failure functions (MTFF), on the basis of algorithm of engine start-up control of armored and military technics units. **Conclusions.** Electric start-up systems, which are part of the tank, directly affect the formation of combat properties of armored and military technic units. Their composition and structure begin with the tasks of providing and commissioning internal combustion engines (ICE), especially in low temperatures. Due to the rapid development of electrical systems, the issue of the organization and technology of repair of armored vehicles, especially in the field, has become much more complicated. Experience in the operation of armored and military technics shows that the durability and safety of engines and starter batteries largely depends on the quality of preparation for starting and starting engines in different conditions. There are numerous instances of engine start-up without sufficient coolant and engine oil, especially during emergency exits of the machine, as well as cases of premature discharge of the batteries due to inaccurate adherence to the engine start-up mode. The proposed algorithm can be used both by repair units and directly by tank crews to reduce the time to restore the performance of the tank starter system.

**Keywords:** engine starter system, starter control, diagnosis algorithm, internal combustion engine, fault finding, minimized table of failure functions.

О. Ю. Барковська, Д. І. Пивоварова, В. С. Сердечний, А. О. Ляшова

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ПРИСКОРЕНИЙ АЛГОРИТМ ПОШУКУ СЛІВ-ОБРАЗІВ У ТЕКСТІ З АДАПТИВНОЮ ДЕКОМПОЗИЦІЄЮ ВИХІДНИХ ДАНИХ

Алгоритми пошуку слів-образів у тексті мають широке застосування - контекстний пошук у базах та банках даних, бібліографічний пошук, пошук фрагменту тексту та його заміна при редагуванні тексту, у задачах стиску даних, алгоритмах прогнозування тощо, що зумовлює актуальність розробки нових алгоритмів, а також вдосконалення та адаптацію існуючих алгоритмів для реалізації на високопродуктивних обчислювачах. **Мета дослідження** – модифікація алгоритму Бойера-Мура пошуку слів-образів у тексті для досягнення скорочення часу пошуку тексту завдяки використанню методів паралельних обчислень та декомпозиції вихідних даних. **Результати та висновки.** В ході роботи вдосконалено існуючий алгоритм Бойера-Мура пошуку слів-образів у тексті завдяки використанню методів паралельних обчислень та декомпозиції вихідних даних, що призвело до скорочення часу пошуку слів-образів у текстах великого обсягу. Виконано огляд існуючих алгоритмів пошуку слів-образів у тексті, який показав найнижчу трудомісткість алгоритму Бойера-Мура. Розроблено дві прискорені модифікації алгоритму Бойера-Мура з простою та адаптивною декомпозицією даних. Аналіз результатів яких показав, що кількість помилкових спрацьовувань при адаптивній декомпозиції прагне до 0, на відміну від простої декомпозиції вхідних даних. Аналіз часу виконання алгоритмів показав, що на маленьких обсягах вихідного тексту, використання паралельних технологій для систем із загальною пам'яттю не є виправданим, оскільки часу на породження паралельних потоків витрачається більше, ніж на компаративні операції.

**Ключові слова:** слово-образ, розпаралелювання, високопродуктивна обчислювальна система, алгоритм Бойера-Мура.

### Вступ

Незважаючи на широкі можливості використання комп'ютерів для обробки різної інформації [1-8], найпопулярнішими є програми, призначені для роботи з текстом [9-16].

Програми для обробки текстової інформації діляться на кілька категорій:

- текстові редактори;
- текстові процесори;
- настільні видавничі програми;
- спеціалізовані програми обробки текстів.

Текстові редактори – це програми для створення, редагування, форматування, збереження й друку документів. Сучасний документ може містити, крім тексту, і інші об'єкти (таблиці, діаграми, малюнки тощо) (рис. 1). Прості текстові редактори призначені для створення нескладного тексту з елементами простого форматування.

Потужний текстовий редактор, що володіє більшими можливостями по обробці текстових документів (наприклад, пошук і заміна символів, засобу перевірки орфографії, вставка таблиць і ін.), зазвичай називають текстовим процесором.



Рис. 1. Об'єкти текстових редакторів

Серед найпопулярніших форматів, із якими працюють текстові редактори, можна виділити TXT, DOC, ODT, RTF, HTML, RTF, PDF.

Основними режимами обробки текстової інформації в ТР є (рис. 2):

- уведення й редагування тексту (основний режим роботи ТР, причому редагування розуміється як будь-яка зміна в набраному тексті);

- форматування тексту (зміна зовнішнього вигляду тексту з метою створення більш ефективного й привабливого документа. Розташування рядків (довжина рядка, міжрядкова відстань, вирівнювання тексту по краю або середині й т.п.), розміри полів і сторінок – усі ці параметри встановлюються користувачем. Часто в ТР доводиться працювати з окремими фрагментами або блоками тексту. Над ними можуть

бути виконані такі дії: переформатування; зміна шрифту; видалення; перенос; копіювання);

- пошук (користувач вказує ключове слово або фразу для пошуку. Результатом є виділення місця в тексті, де зустрічається дане ключове слово або фраза), заміна тексту (як правило є наступною командою після команди пошук. Результатом є заміна знайденого ключового слова або фрази при пошуку слова на інше слово або фразу, зазначену користувачем);

- орфографічний контроль;

- робота з файлами (полягає в створенні, збереженні й відкритті файлу для роботи в текстовому редакторі);

- друк;

- переклад тексту;

- допомога.



Рис. 2. Операції форматування тексту

Більшість зазначених можливостей присутні в багатьох існуючих редакторах, однак мають ряд недоліків, наприклад, швидкість роботи при пошуку й заміні ключових фраз (символів) у текстах великого розміру, а також відсутність можливості вбудованого перекладу тексту.

**Постановка завдання.** Метою роботи є модифікація алгоритму Бойера-Мура для пошуку слів-образів у тексті для досягнення прискореного пошуку тексту завдяки використанню методів паралельних обчислень та декомпозиції вихідних даних.

Досягнення поставленої мети можливе шляхом вирішення таких задач:

- огляд існуючих алгоритмів пошуку слів-образів у тексті;

- аналіз обчислювальної трудомісткості та часу реалізації розглянутих алгоритмів;

- розробка прискореної модифікації алгоритму Бойера-Мура з простою декомпозицією даних;

- розробка прискореної модифікації алгоритму Бойера-Мура з адаптивною декомпозицією даних;

- аналіз часу пошуку слів-образів різного розміру у текстових документах із різною вхідною кількістю символів при реалізації традиційного послідовного лінійного алгоритму, а також прискореної модифікації алгоритму БМ.

## 1. Аналіз існуючих методів пошуку тексту в документі

Зі збільшенням різноманіття текстових редакторів, розширенням її функціональних можливостей, зростанням обсягів інформації, яка зберігається та передається по мережі, роль задачі швидкого

пошуку слова-образу у тексті стає більш актуальною. Основним застосуванням алгоритмів пошуку можуть бути контекстний пошук у базах та банках даних [15], бібліографічний пошук, пошук фрагменту тексту та його заміна при редагуванні тексту, у задачах стиску даних [16], в області захисту інформації [10, 13, 14], алгоритмах прогнозування тощо (рис. 3).

Саме внаслідок описаної важливості рішення задачі пошуку слів-образів у тексті, цією задачею займається велика кількість дослідників у різних країнах світу [9-14]. Серед існуючих алгоритмів пошуку слів-образів у текст можна виділити такі алгоритми (рис. 4):

- лінійний пошук;

- алгоритм Бойера-Мура (БМ);

- алгоритм Кнута-Морріса;

- алгоритм Рабіна-Карпа (РК).

У роботі розглядаються такі області застосування алгоритмів пошуку, як швидкий пошук слів-образів у тексті для використання у текстових редакторах та процесорах на етапі редагування тексту (пошук тексту або пошук та заміна тексту).

Основні визначення, які використовуються в роботі, наведені нижче.

Словом-образом будемо називати послідовність символів або букв деякого алфавіту, яке необхідно знайти в тексті. Для рядку важливий склад і кількість символів в ньому, а також порядок проходження символів в рядку. Довжина рядка – це кількість символів в ньому. Наприклад, слово "ababcaba" має довжину 8. Порожній рядок – це рядок, що не містить символів, тобто має нульову довжину.

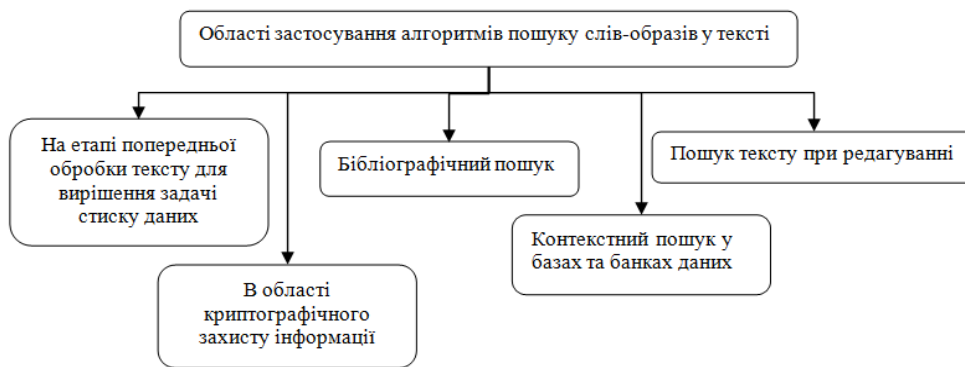


Рис. 3. Області застосування алгоритмів пошуку слів-образів у тексті

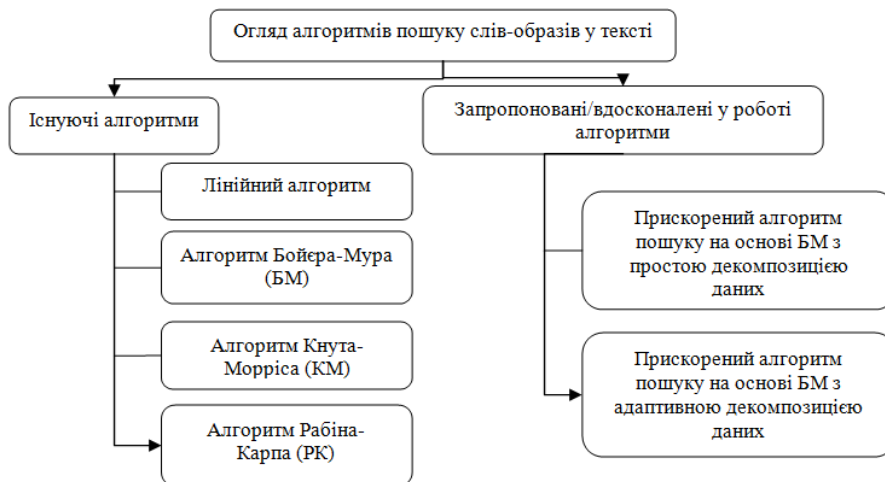


Рис. 4. Огляд алгоритмів пошуку слів-образів у тексті

Під операцією компарації розуміється порівняння символів шуканого слова і тексту для виявлення їх збігу або розходження в процесі ідентифікації рядка. Два рядки є співпадаючими, якщо вони мають один і той же склад символів, рівну довжину і однаковий порядок проходження символів. Рядки "aba" і "aab" не збігаються, тому що, хоча їх склад і довжина однакові, але порядок символів різний. Аналогічно, рядки "aaa" і "aaaaa" теж різні, оскільки мають різну довжину.

Будь-яка послідовно взята частина рядка є її підсловом. Будемо позначати символи слова буквами  $W$  з індексами, відповідними номерам цих символів в слові. При цьому символи з різними номерами можуть збігатися, тобто літери в рядку не обов'язково всі повинні бути різними. Наприклад, слово "ababcaba"= $W_1 W_2 \dots W_7 W_8$ , де довжина слова визначається як  $j = 8$ ,  $j = \overline{1, \ell}$ . Символи тексту будемо позначати буквами  $T$  з відповідними індексами:  $T_1 T_2 \dots T_i$ , де довжина тексту визначається як  $i = \overline{1, t}$ . Входження заданого образу в певний текст вважається знайденим, якщо він є підсловом цього тексту і визначено його початок в тексті.

Для пошуку слова-образу в тексті за основу взято алгоритм Бойера-Мура-Хорспула, принцип роботи якого наступний: нехай заданий масив  $T_3$  із  $t$  елементів і масив  $W$  з  $\ell$  елементів, причому  $0 \leq \ell < t$ . Пошук рядка виявляє входження  $W$  в  $T$ .

Обидва масиви містять символи, так що  $T_3$  можна вважати деяким текстом або рядком, а  $W$  – образом, який необхідно знайти.

Етапи роботи алгоритму [9]:

- формування таблиці  $d$ , яка буде використовуватися для зміщення образу по рядку;
- пошук образу в рядку.

Порівняння символів починається з кінця образу, а не з початку. Ефективність алгоритму Бойри-Мура-Хорспула обумовлена тим, що вдається пропускати ті частини тексту, які свідомо не беруть участь в успішному зіставленні.

Трудомісткість алгоритмів пошуку слів-образів у тексті визначається кількістю компарації символів у шуканому слові-образі довжиною  $\ell$  із вихідним текстом довжиною  $t$ , яка має бути виконана у процесі роботи алгоритму.

Середня трудомісткість розглянутих існуючих алгоритмів наведена у табл. 1.

Таблиця 1 – Середня трудомісткість існуючих алгоритмів пошуку слів-образів у тексті

Алгоритм пошуку слів-образів у тексті	Середня трудомісткість алгоритму
Лінійний пошук	$O((t - \ell) \times \ell)$
Алгоритм Бойера-Мура (БМ)	$O(t / \ell)$
Алгоритм Кнута-Морріса	$O(t + \ell)$
Алгоритм Рабіна-Карпа (РК)	$O((t - \ell) \times \ell)$

Оскільки найменшу трудомісткість має алгоритм Бойера-Мура, його принцип роботи буде взято за основу при подальшому вдосконаленні для досягнення меншого часу роботи наведеного методу. Існуючі модифікації алгоритму БМ наведені у [9, 11, 12].

## 2. Рішення поставленої задачі

**2.1. Розробка прискореного алгоритму на основі БМ з простою декомпозицією вихідних даних.** Аналіз алгоритму БМ показує можливість паралельної реалізації пошуку слів-образів на багато-процесорній обчислювальній системі із загальною пам'яттю. Такі системи, як правило, складаються з декількох однорідних процесорів і масиву загальної пам'яті. Кожен з процесорів має прямий доступ до будь-якої комірки пам'яті, причому швидкість доступу до пам'яті для всіх процесорів однакова. Зазвичай процесори підключаються до пам'яті за допомогою загальної шини або за допомогою спеціальних комутаторів. У багато-процесорній системі із загальною пам'яттю один процесор здійснює запис в конкретну комірку пам'яті, а інший процесор робить зчитування з цього місця пам'яті. Щоб забезпечити узгодженість даних і синхронізацію процесів, обмін часто реалізується за принципом взаємно виключного доступу до спільної пам'яті. Далі в областях розпаралелювання породжується ряд паралельних потоків, які виконуються на різних процесорах, які входять в обчислювальну систему [1-8].

Робота починається з ініціалізації і роботи головного потоку (процесу), який у міру необхідності створює і виконує паралельні потоки, передаючи їм необхідні дані. Паралельні потоки з однієї паралельної області програми виконуються незалежно один від одного. Після завершення виконання паралельних потоків, управління програмою знову передається головному потоку. Для прискорення роботи розглянутих методів пошуку слів-образів у тексті, пропонується їх виконання в паралельному вигляді. За основу взято алгоритм БМ, оскільки саме він має найменшу трудомісткість. Для можливості ефективного розпаралелювання виконується декомпозиція вхідних даних, оскільки залежності між даними немає. Тобто, кожна підгрупа даних після декомпозиції може бути оброблена незалежно одна від одної і залежності від результатів операцій, що знаходяться в попередніх групах, немає. Важливою умовою є отримання вірного результату, тобто знаходження 100% шуканих слів-образів у тексті.

Згадаємо, що алгоритм БМ має два етапи. При створенні паралельної модифікації алгоритму пропонується перший етап – створення таблиці зміщення, виконувати на головному процесорі  $P_0$ , а вже починаючи з другого етапу – пошук слова в тексті виконувати незалежно на різних обчислювальних процесорах  $P_i$ , де  $i = \overline{0, n}$ , на різних наборах даних.

Для рівномірного обчислювального навантаження на потоки, обсяг обчислень для кожного з них повинен бути приблизно однаковий. Ґрунтуючись на цьому твердженні, можна зробити висновок, що розпаралелювання запропонованого методу пошуку є

обґрунтованим, так як робота другого етапу алгоритму БМ буде однаковою для кожного обчислювача і буде залежати лише від розміру підзадач, обробка яких виконується паралельно. Робота кожного процесора буде виконуватись на даних однакового розміру, буде мати однакову обчислювальну складність що дозволяє мінімізувати наявність інформаційних зв'язків між підзадачами та вирівняти обчислювальне навантаження для кожного процесора.

Нехай задано вхідний текст  $T$ , де одним із символів є  $T_i$ ,  $i = \overline{1, t}$ . Тоді шукане слово-образ  $W$ , яке складається із символів  $W_j$ , буде включати  $j$  символів:  $j = \overline{1, \ell}$ . На початку роботи алгоритму виконується завантаження тексту та слова-образу у загальну пам'ять центрального процесора. На головному процесорі починається послідовна частина роботи алгоритму, а саме – формування таблиці зміщення (рис. 5). Після формування таблиці, починається породження паралельних потоків  $P = [P_0, P_1, \dots, P_c]$ ,  $c = \overline{1, n-1}$  та ініціюється звернення усіх процесорів до загальної пам'яті для отримання своєї інформації, а саме – таблиці зміщення та блоку тексту, розмір якого визначається за правилом: потік  $P_c$  отримує набір даних в інтервалі  $[T \cdot t / (n/c) + 1, \dots, T \cdot t / (n/c + 1)]$ .

Після отримання різних наборів даних однакового розміру та єдиної для всіх потоків інструкції, починається обчислювальний другий етап алгоритму БМ. Після завершення обробки тексту усіма потоками починається етап об'єднання результатів та знайдених слів-образів. Характерною рисою для цього підходу є жорстке закріплення блоків даних за кожним потоком, не зважаючи на розмір шуканого слова-образу  $W_i$ .

**2.2. Розробка прискореного алгоритму на основі БМ з адаптивною декомпозицією вихідних даних.** Ще однією прискореною модифікацією алгоритму БМ є прискорена модифікація алгоритму БМ з адаптивною декомпозицією даних, що свідчить про те, що при визначенні блоку даних для кожного потоку враховується розмір слова-образу.

Виконання алгоритму майже ідентичне попередньому підходу, окрім правила формування блоків даних перед тим, як кожен потік перейде до виконання другого компаративного етапу алгоритму БМ. Розмір блоку тексту для кожного потоку визначається за правилом: потік  $P_c$  отримує набір даних в інтервалі  $[T \cdot t / (n/c) + 1, \dots, T \cdot t / (n/c + 1)]$ .

Тобто, розмір блоку даних для кожного потоку збільшився на  $\ell$ . Після завершення компаративного етапу кожним потоком паралельної області, управління передається основному потоку, який займається збором частин обробленого тексту. Після цього виконання знову переходить в паралельну область. Механізм розпаралелювання для обчислювальної системи із загальною пам'яттю, породження паралельних потоків, декомпозиція вихідних даних у відповідності із правилом fork-join [3, 4] зображено на рис. 5.

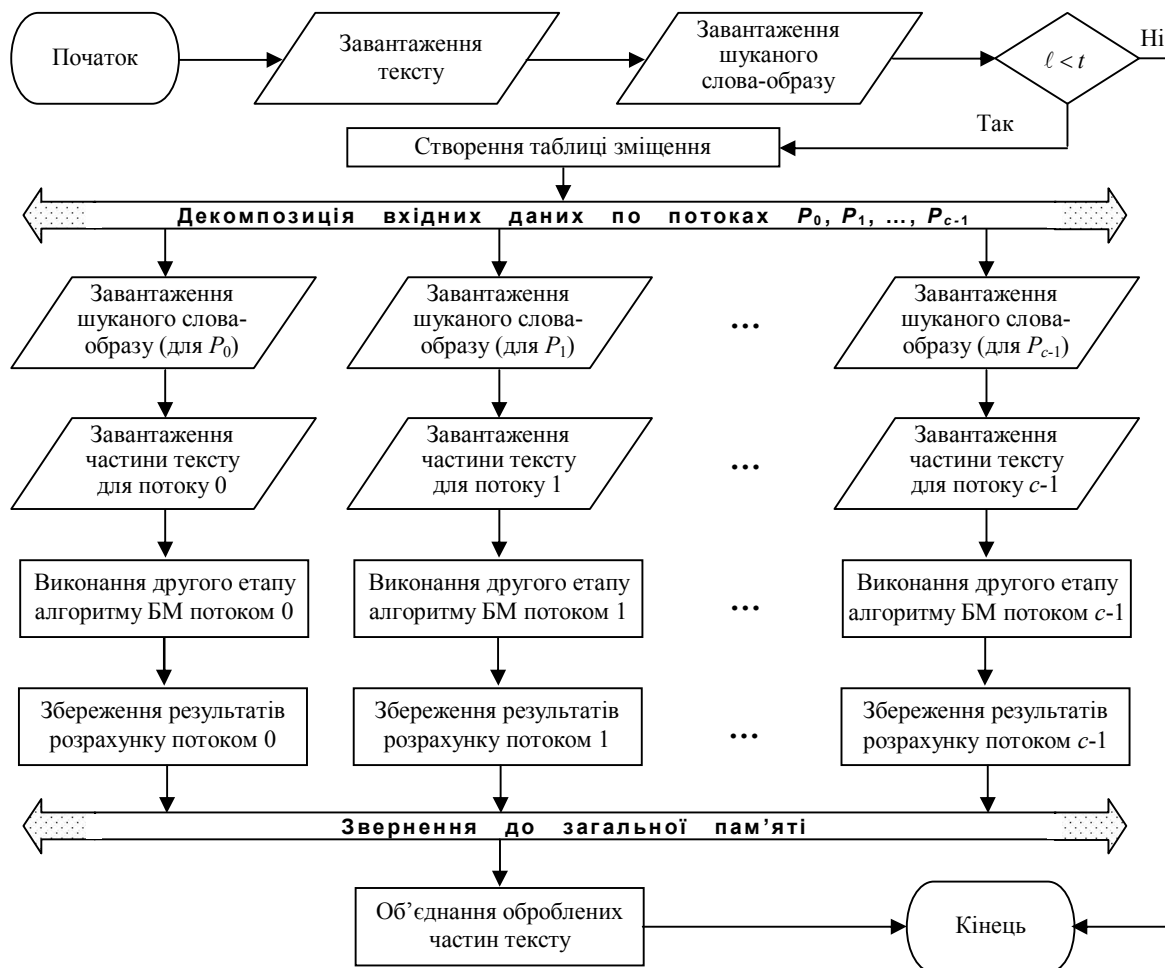


Рис. 5. Прискорена модифікація алгоритму БМ з адаптивною декомпозицією даних

### 3. Аналіз отриманих результатів

Тестування функції пошуку та пошуку і заміни елементів було проведено на різних тестових наборах: послідовний пошук одного символу у тексті розміром 1902 символи; послідовний пошук чотирьох символів у тексті розміром 1902 символи; послідовний пошук дев'яти символів у тексті розміром 1902 символи; послідовний пошук одного символу у тексті розміром 18598 символи; послідовний пошук чотирьох символів у тексті розміром 18598 символи; послідовний пошук дев'яти символів у тексті розміром 18598 символи. В результаті виконання пошуку елементів були отримані результати для тексту розміром 1 сторінка (1902 символів) (рис. 6). Аналіз отриманих результатів показав, що при збільшенні шуканих символів, час пошуку збільшується так само, як і збільшується час пошуку при збільшенні обсягу вихідного тексту.

Кількість помилкових спрацьовувань та час виконання пошуку слів-образів, а також пошуку та заміни слів-образів у тексті із використанням технології паралельного програмування на системах із загальною пам'яттю при різних запропонованих підходах до декомпозиції даних, наведено у таблицях 2-4, де позначено:  $K_{Поч}$  – кількість символів в початковому тексті;  $K_{Пош}$  – кількість символів для пошуку;  $T_{Витр}$  – витрачений час (мс);  $K_{Пом}$  – кількість помилкових спрацьовувань. Отримані дані доводять відсутність

необхідності використання більше одного обчислювача при роботі з невеликими обсягами даних. Адаптивна декомпозиція даних завдяки тому, що при розподіленні вихідного тексту по обчислювачам враховується довжина шуканого слова, забезпечує швидкий та безпомилковий пошук слів-образів у тексті.

Таблиця 2 – Витрачений час послідовного пошуку слів-образів у тексті

$K_{Поч}$	$K_{Пош}$	$T_{Витр}$
1902	1 символ	0,29
1902	1 слово (4 символи)	0,30
1902	1 слово (9 символи)	0,98
18598	1 символ	5
18598	1 слово (4 символи)	8,9
18598	1 слово (9 символи)	11,6

Таблиця 3 – Витрачений час прискореного пошуку слів-образів у тексті при простій декомпозиції даних

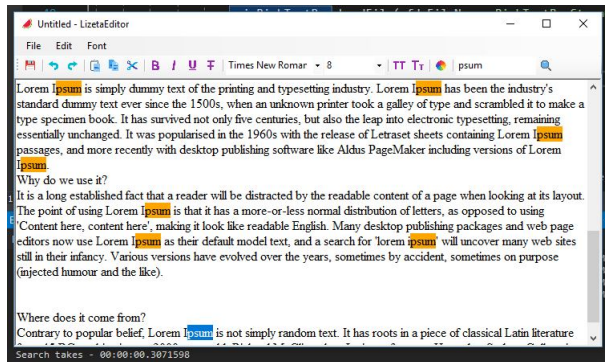
$K_{Поч}$	$K_{Пош}$	$T_{Витр}$	$K_{Пом}$
1902	1 символ	0,32	0
1902	1 слово (4 символи)	0,31	2
1902	1 слово (9 символи)	0,87	4
18598	1 символ	4,5	0
18598	1 слово (4 символи)	4,5	3
18598	1 слово (9 символи)	4	4



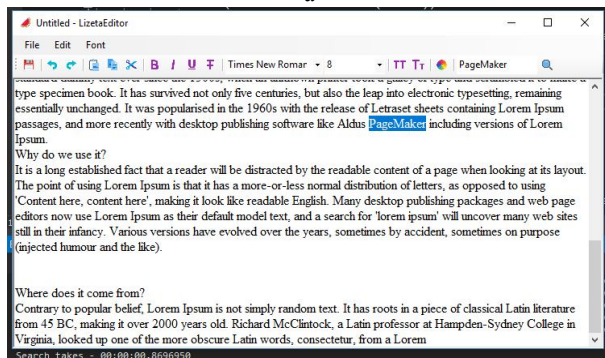
Таблиця 4 – Витрачений час прискореного пошуку слів-образів у тексті при адаптивній декомпозиції даних

Ключ	Кпош	Твир	Кпом
1902	1 символ	0,31	0
1902	1 слово (4 символи)	0,31	0
1902	1 слово (9 символи)	0,85	0
18598	1 символ	5	0
18598	1 слово (4 символи)	4,65	0
18598	1 слово (9 символи)	3,56	0

Графік отриманого прискорення у порівнянні із послідовною реалізацією наведено на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Пошук слів-образів у тексті розміром 1902 символи:  
а – розмір слова-образу – 1 символ,  
б – розмір слова-образу – 9 символів

На підставі отриманих таблиць 2-4, було побудовано діаграми для аналізу результатів, що зображені на рис. 7, 8. Таким чином, було виявлено, що зі збільшенням розміру слова для пошуку прямо пропорційно зменшувався час на його пошук по усьому тексті через задіяння більшої кількості ядер.



Рис. 7. Графік отриманого прискорення для методу адаптивної декомпозиції відносно послідовної реалізації алгоритму

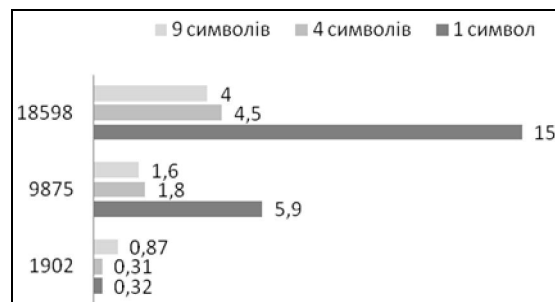


Рис. 8. Діаграма результатів пошуку слів-образів у тексті

## Висновки

В ході роботи було вдосконалено існуючий алгоритм Бойера-Мура пошуку слів-образів у тексті для скорочення часу пошуку завдяки використанню методів паралельних обчислень та декомпозиції вихідних даних. Було виконано огляд існуючих алгоритмів пошуку слів-образів у тексті, який показав найнижчу трудомісткість алгоритму БМ. Було розроблено дві прискорені модифікації алгоритму Бойера-Мура з простою декомпозицією даних та адаптивною декомпозицією даних, аналіз результатів яких показав, що кількість помилкових спрацьовувань при адаптивній декомпозиції прагне до 0, на відміну від простої декомпозиції вхідних даних. Аналіз часу виконання алгоритмів показав, що на маленьких обсягах вихідного тексту, використання паралельних технологій для систем із загальною пам'яттю не є виправданим, оскільки часу на породження паралельних потоків витрачається більше, аніж на компаративні операції.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Левин М.П. Параллельное программирование с использованием OpenMP / М.П. Левин. – БИНОМ. Лаборатория знаний, Интернет-университет информационных технологий, 2008. – 120с.
2. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP. – М.: МГУ, 2009. – 77 с.
3. Эндрюс Г. Р. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования / Г.Р. Эндрюс. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 512 с.
4. Миллер Р. Последовательные и параллельные алгоритмы: Общий подход / Р. Миллер, Л. Боксер. – БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 406 с.
5. V. Kharchenko, A. Kovalenko, O. Siora, V. Sklyar, "Security assessment of FPGA-based safety-critical systems: US NRC requirements context", *Proceedings of IEEE Information and Digital Technologies Conference (IDT)*, pp. 132-138, July 2015. DOI: <http://doi.org/10.1109/DT.2015.7222963>
6. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)

7. Kharchenko, V., Illiashenko, O., Kovalenko, A., Sklyar, V., Boyarchuk, A. Security informed safety assessment of NPP I&C systems: GAP-IMECA technique. Proc. 22th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE), Prague, Republic, 7-11 Jul. 2014, pp. 1-9. doi: <http://doi.org/10.1115/ICONE22-31175>.
8. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
9. Z. Xiong, "A Composite Boyer-Moore Algorithm for the String Matching Problem," 2010 International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, Wuhan, 2010, pp. 492-496. doi: 10.1109/PDCAT.2010.58
10. A. Domínguez, P. P. Carballo and A. Núñez, "Programmable SoC platform for deep packet inspection using enhanced Boyer-Moore algorithm," 2017 12th International Symposium on Reconfigurable Communication-centric Systems-on-Chip (ReCoSoC), Madrid, 2017, pp. 1-8. doi: 10.1109/ReCoSoC.2017.8016159
11. Y. Jeong, M. Lee, D. Nam, J. Kim and S. Hwang, "High Performance Parallelization of Boyer-Moore Algorithm on Many-Core Accelerators," 2014 International Conference on Cloud and Autonomic Computing, London, 2014, pp. 265-272. doi: 10.1109/ICCAC.2014.20
12. X. Zha and S. Sahni, "GPU-to-GPU and Host-to-Host Multipattern String Matching on a GPU," in IEEE Transactions on Computers, vol. 62, no. 6, pp. 1156-1169, June 2013. doi: 10.1109/TC.2012.61
13. V. Gupta, M. Singhand V. K. Bhalla, "Pattern matching algorithms for intrusion detection and prevention system: A comparative analysis," 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), New Delhi, 2014, pp. 50-54. doi: 10.1109/ICACCI.2014.6968595
14. Y. Wang and H. Kobayashi, "An Improved Technology for Content Matching Intrusion Detection System," 2006 Int. Conf. on Software in Telecommunications and Computer Networks, Split, 2006, pp. 238-241. doi: 10.1109/SOFTCOM.2006.329755
15. V. R. Krishna and P. V. Kumar, "Optimal pattern search for sequence databases," 2010 3rd Int. Conf. on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), Chengdu, 2010, pp. V2-654-V2-658. doi: 10.1109/ICACTE.2010.5579518
16. P. Lin, S. Liu, L. Zhang and P. Huang, "Compressed Pattern Matching in DNA Sequences Using Multithreaded Technology," 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Beijing, 2009, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICBBE.2009.5162550

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. О. Ляшенко,

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, Харків

Received (Надійшла) 18.06.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

#### Ускоренный алгоритм поиска слов-образов в тексте с адаптивной декомпозицией выходных данных

О. Ю. Барковская, Д. И. Пивоварова, В. С. Сердечный, А. А. Ляшова

Алгоритмы поиска слов-образов в тексте имеют широкое применение - контекстный поиск в базах и банках данных, библиографический поиск, поиск фрагмента текста и его замена при редактировании, в задачах сжатия данных, алгоритмах прогнозирования и т.п., что обуславливает актуальность разработки новых алгоритмов, а также совершенствования и адаптации существующих алгоритмов для реализации на высокопроизводительных вычислителях. **Цель исследования** - модификация алгоритма Бойера-Мура для поиска слов-образов в тексте для достижения сокращения времени поиска текста благодаря использованию методов параллельных вычислений и декомпозиции исходных данных. **Результаты и выводы.** В ходе работы усовершенствован существующий алгоритм Бойера-Мура поиска слов-образов в тексте благодаря использованию методов параллельных вычислений и декомпозиции исходных данных. Выполнен обзор существующих алгоритмов поиска слов-образов в тексте, который показал самую низкую трудоемкость алгоритма Бойера-Мура. Разработаны две ускоренные модификации алгоритма Бойера-Мура с простой и адаптивной декомпозицией данных. Анализ результатов показал, что количество ложных срабатываний при адаптивной декомпозиции стремится к 0, в отличие от простой декомпозиции входных данных. Анализ времени выполнения алгоритмов показал, что на маленьких объемах исходного текста, использование параллельных технологий для систем с общей памятью не является оправданным, поскольку времени на порождение параллельных потоков тратится больше, чем на компаративные операции.

**Ключевые слова:** слово-образ, распараллеливание, высокопроизводительная вычислительная система, алгоритм Бойера-Мура.

#### Accelerated algorithm for word search in text with adaptive decomposition of the output

O. Yu. Barkovska, D. I. Pyvovarova, V. S. Serdechnyi, A. A. Liashova

Word search algorithms in text are widely used - contextual search in databases and databases, bibliographic search, search for a text fragment and its replacement when editing, in data compression tasks, prediction algorithms, etc., which determines the urgency of developing new algorithms, as well as improving and adapting existing algorithms for implementation on high-performance computers. **The purpose of the research** is to modify the Boyer-Moore algorithm to search for word-images in text to achieve reduced text search time by using parallel computation methods and decomposing raw data. **Results and conclusions.** In the course of the work, the existing Boyer-Moore algorithm for word search in text has been improved by the use of parallel computation methods and decomposition of raw data. An overview of the existing word search algorithms in the text was performed, which showed the lowest complexity of the Boyer-Moore algorithm. Two accelerated modifications of the Boyer-Moore algorithm with simple and adaptive data decomposition are developed. Analysis of the results showed that the number of false positives in adaptive decomposition tends to 0, as opposed to simple decomposition of the input data. An analysis of the execution time of the algorithms showed that on small volumes of the source text, the use of parallel technologies for systems with shared memory is not justified, since the time for generation of parallel flows is spent more than for comparative operations.

**Keywords:** word-image, parallelization, high-performance computing system, Boyer-Moore algorithm.

A. Havrylyshyn, T. Dmytrenko, T. Derkach, A. Dmytrenko

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

## DEVELOPMENT OF INFORMATIONAL SYSTEM FOR THE ELECTRONIC EDUCATIONAL AND METHODOLOGICAL COMPLEX OF THE DISCIPLINE

In this article is discussed the possibilities of students independent work of higher education institutions based on the use of electronic educational and methodological complexes as a component of the educational information environment of an educational institution, structure, advantages and disadvantages of its use in the educational process. The electronic educational and methodological complex structure as a full-fledged component of the modern educational process and criteria for its creation has been determined. The analysis was carried out and the existing educational information systems and electronic educational and methodological complexes were characterized. A list of training products that are included in the electronic educational-methodological complex structure of the discipline is given. The developed electronic educational and methodological complex, the scope of its application and use is presented. The diagrams of use cases were presented for individual users types. An introduction to the system of two types of users was provided. The functions and principles of the main service components, which allow organizing a planned, cognitive, organizational and methodological orientation of students' activities, which are targeting to achieve a result: the assimilation of a certain academic discipline, which students master independently without the information support and communication technologies. The developed database is presented, which enables you to operate educational complex. It was identified the main advantages and disadvantages of existing educational information systems. Attention was focused on the issue of assessing the quality of learning outcomes.

**Keywords:** electronic manual, electronic educational and methodological complex, information technologies, information environment, educational process.

### Introduction

The current state of the development of the higher education system requires using the latest data in the field of information and communication technologies. Modern technologies allow not only to increase the efficiency of traditional forms of learning, but also focus on the activity of independent work of students in studying discipline, the process of effective management and appointment of students [1-11].

In the context of the socio-economic changes that taking place in our country, the development and implementation of innovative technologies in the educational process is one of the most important ways of improving education.

**Analysis of recent research and publications.** Fedorchuk I.I. gave attention to the problems of scientific and methodological provision of educational process in high school [6]. The questions of designing and developing electronic teaching and learning complexes were considered by many authors Efremov O. [7], Vasyukevich V.V. [2], Gurevich R.S. [6, 7]. Using of electronic educational and methodological complexes in the professional training of students of higher educational was considered by scientists Tatarintsev A.I. [2], Kuznetsova N.M. [1].

When I analyzing works devoted to the implementation of information technologies [9] in education, I have determined that during the years of informatization of education accumulated quite a wealth of practical experience in the development of computer didactic means, in particular electronic textbooks (ETs), but there is a need for fundamental research and development of the very electronic educational and methodological complexes (EEMC) that would have a significant role in optimizing the learning process.

**The purpose of the article** is to determine the structure of the electronic educational and methodological

complex as a full-fledged component of the modern educational process and criteria for its creation, analysis and characterization of existing information systems, presentation of the designed EEMC, its functionality and its main components.

### The main part of the article

By appointment, pedagogical software has the following varieties [6]:

- computer tutorials (lessons);
- training programs (tutors);
- controlling (testing software);
- information and referencing (encyclopedias);
- imitation
- simulating;
- demonstration (slide or video);
- educational game;
- permits (computer games: arcade, quests, strategies, role-playing, logical, sports, etc.).

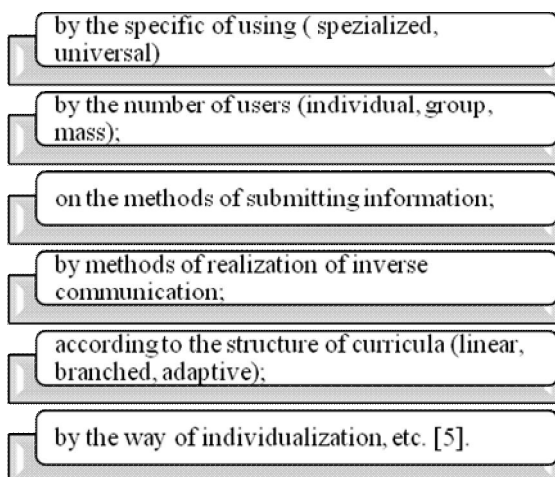
The need to use the ETs and EEMC in vocational education is dictated by several circumstances. First of all, they should include the fundamental changes of the present, which put on the agenda the question of the transition to a new strategy for the development of society based on knowledge and promising high-tech technologies. In the modern national system of vocational education in the conditions of continuous increase of information flow, the processes of information and computerization become more important. New information technologies provide the implementation of new approaches to learning, provide new tools and methods for finding and managing knowledge. At the present stage of development of education, the value of use in education of the ETs increases, due to the active implementation of information technologies that help to broaden the material, therefore, the development of the EEMC is relevant both for teachers and for students of all educational institutions.

Media applications use a certain way of transmitting information [6]:

- Interaction of various information blocks (text, graphics, video clips) with the help of hyperlinks. Hyperlinks are presented as a specially designed text, or as a specific graphic image. At the same time, several hyperlinks can be located on the screen, and each of them defines its route.

- Interactivity, that is, the dialogue mode of the user with a source in which he can independently choose the information he needs to speed and the sequence of its transmission.

Types of electronic textbooks:



After I was analyzing different literary sources, I can define the main interpretations regarding EEMC: EEMC is a realization of the educational-methodical complex in electronic form. EEMC can be used both in network and case versions, depending on students' needs and capabilities. Application of EEMC in the teaching process allows to greatly use the great opportunities provided by modern telecommunication technologies [2].

The electronic educational and methodical complex is an automated system that includes information and reference materials on the discipline and allows them to be used comprehensively for the acquisition of knowledge, skills, control and self-control for this process. The EEMC consists of pages, but its structure is nonlinear. Information is provided not only in the form of text, but also graphs, charts, animations, sound and video. With hypertext, the user can jump to another page and get an explanation, flash-animated or video fragments in this way. [3].

Electronic educational and methodical complex is a system of materials that reflects the model of the educational process and is intended for practical using by teachers and students. It regulates all types of educational activities of students and greatly facilitates the work of the teacher through the active use of methodological support [4].

Based on the foregoing, I would point out that the electronic educational and methodical complex is an informational educational resource intended for the description of the structured educational material of the discipline.

As a means of integrated action in the educational process EEMC allows:

- assist students in studying and systematizing theoretical knowledge;
- to develop practical skills and abilities;
- rationally combine different forms of learning;
- to teach the studied material in various forms (text, tables, graphs, multimedia presentations, schematic images, etc.);
- control the learning process (self-control and control by the teacher);
- to effectively manage independent work;
- to implement an individual approach [1].

**Requirements for EEMC.** EEMC unites in a digital form text, graphic and video images, on this basis, new teaching tools are created. Obviously, the efficiency of the information process depends directly on the effectiveness of the processes of creating and using an information resource. With the help of EEMC, the student is an active participant and can control the educational process himself. The EEMC conducts structuring of lectures, organization of practical classes, which are accompanied by multimedia, which allows to significantly expand the area of knowledge, comparison of facts and observations. Lectures can be presented not only in electronic (printed) form, but also in audiovisual - with a demonstration of slides, video clips. Tasks for the students may be aimed at independent research, search, creative activity, which requires an independent problem solving, the creation of their own knowledge.

The structure of the EEMC includes a certain list of educational products: methodological materials: annotation, curriculum, work program; teaching materials: lectures, laboratory works, terminology; knowledge control: evaluation criteria, tasks for self-training, tests, questions for the test, exam; literature: basic, additional, Internet; the hard tasks of students.

The development of educational-methodical complexes of the discipline aims at:

- ensuring the systematic organization of the educational process;
- improving the quality of methodological provision of the educational process;
- timely adjustment and improvement of the electronic and methodical complex.

In the process of preparation and using in the educational process of the EEMC it is necessary to be guided by the modular approach, which allows the successful solution of a number of educational tasks:

- forming a subjective position of the student;
- realization of the educational goal in the process of cooperation of the teacher with the students;
- generation of students in productive thinking during classes;
- use in the process of preparing educational products organizational and activity methods that will promote the development of their abilities, which will correspond to their future professional activities;
- orientation of students to self-assessment of the obtained learning result.

Among the main requirements for information systems, it should be noted [7]:

1. The effectiveness of the information system - is determined by comparing all the costs associated with

the measures considered and the results obtained at the same time.

2. The quality of the functioning of the information system - degree of system adaptability to perform the specified functions. Among the main properties that determine the quality of the functioning of the information system, distinguish:

- adequacy of the functioning of the information system;
- availability of technical capabilities of the information system to interact, improve and develop;
- reliability and timeliness of information submission and implementation of functional technological operations;
- completeness, error-free, relevance and confidentiality of the information presented.

3. The reliability of the information system is determined by the reliability of technical means of its equipment and errors of the executors.

4. Security of the information system provides for its functioning, which provides: protection of information circulating in this system; protection of users of the information system from the harmful effects of both information circulating in this system and objects of the system itself; protection of information system and its objects from unauthorized change of its specified parameters and operating mode.

**Advantages and disadvantages of EEMC.** The advantages of using of the EEMC are:

- variety of forms of information presentation;
- differentiation of training, which consists in division of tasks according to the levels of complexity, taking into account the individual characteristics of students;
- intensification of independent work, which consists in strengthening the activity of self-study, self-control, student self-assessment;
- increasing of motivation, interest and cognitive activity at the expense of various forms of work, the possibility of the inclusion of the playing torque and the use of various forms of information representation;
- timely and objective assessment of student performance [4].

Along with the above-mentioned advantages one can distinguish one more advantage: the possibility for students to study remotely, having the opportunity to access the Internet, receive consultations of teachers and report on the study material. Structured electronic teaching and learning complexes can be located in the local university network, on the Internet, on electronic media, which allows students to fully provide the necessary information on discipline. The information bank of discipline (electronic textbooks and manuals, demonstrations, test and other tasks, examples of projects already executed, topics of course papers and theses, tasks for independent and individual work), which is part of the electronic teaching aids, must be constantly updated. [4].

However, the use of EEMC in the educational process has a number of disadvantage: lack of desire for students to study and control the material of classroom lectures, which is already partly in EEMC; the study of

electronic materials often dismisses students from working with traditional textbooks, manuals, scientific literature; fast fatigability of students during some of the work associated with EEMC.

**Comparative analyses of exiting educational informational systems.** To determine the key characteristics of the developing system, an analysis of existing e-learning systems was carried out and their features were determined.

For comparison, I have chosen systems of electronic teaching of some of the most prestigious European universities:

- Department of continuing education (University of Oxford). There are a large number of courses in any given field on this resource. All courses are taught in English. One of the advantages is the possibility of studying in any part of the world, there is no need to be a university student for the course, certificates of graduation will be recognized as valid in other universities and in any work.

- Institute of Continuing education (University of Cambridge). The benefits of this resource include the possibility of revising courses not only for distance learning, but also for choosing summer courses, intensities, advanced training courses (for undergraduate and postgraduate students), some courses can be held not only in English but also in Spanish, German and French. in languages. The disadvantages are a relatively small number of online courses, compared with Oxford University, the cost of training at the same level.

In Ukraine, EEMC is not yet quite widespread; each of the existing ones has more disadvantages than advantages.

**The structure of the projected complex of electronic education.** The developed complex will help to systematize course materials for easier using.

This system provides two types of users (Fig. 1, 2):

1. *Teacher.* The teacher has the opportunity to create a course, invite students to join the course, download materials, edit and delete courses, course participants. The bulk of the functional is transferred to the teacher, so he acts as the administrator of the resource.

2. *Student.* The student joins the course for the received link, has the opportunity to view the materials of the course, download them.

Also, both the teacher and the student have the opportunity to comment on the course.

For the full functioning of the electronic teaching and learning complex, it is necessary to create such tables in the database (Fig. 3):

- user - system user table. It records the user's login information, his role on the site, and such business information as the registration date.

- course - the table of existing courses covers information about the course title, the user who created the course and the date of creation.

- file - the table in which all the materials that the teacher added to the course will be stored. Each file in the table will have its own type (lecture, laboratory work, methodical instructions, etc.) and order on the page.

- report - the table that stores object reports with data about them.

– comments – the table in which the comments for the course will be kept. I will keep the following data, as to which course of comment, who left it, when the text of the comment itself.

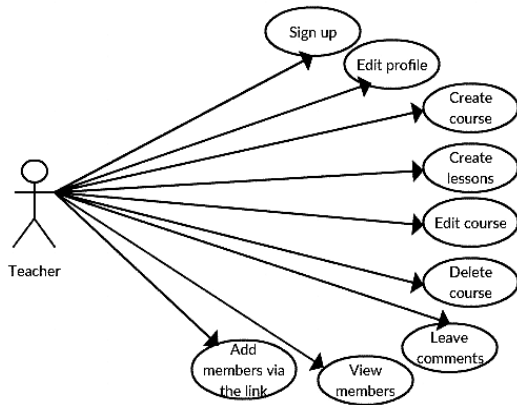


Fig. 1. Diagram of options for use by the teacher (teacher Use-Casediagram)

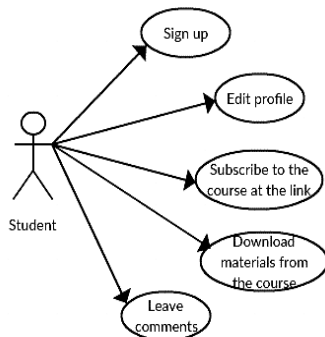


Fig. 2. Diagram of options for use by the student (student Use-Casediagram)

**Structure of the database of the designed electronic educational and methodical complex.** The architecture of a web resource is not difficult to understand and use (Fig. 4). All fields and the required functionality are easily accessible and can be accessed in two clicks of the mouse.

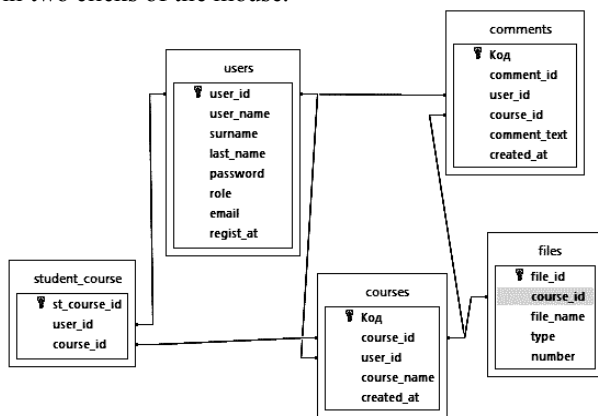


Fig. 3. Structure of the database

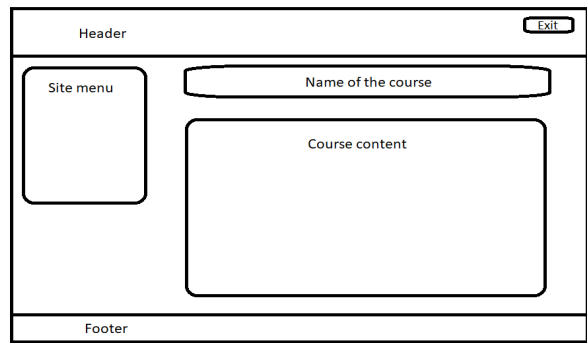


Fig. 4. Web resource scheme

An important aspect is the question of assessing the quality of learning outcomes. The bulk of the tools for assessing the level of learning information is now a closed form in which the activities of those studying is reduced to the choice of answer from the proposed. The construction of open-ended instruments, when students can demonstrate their creativity, individuality is a scientific and scientific-methodical problem, but is still not solved and requires the solution of the problem of "artificial intelligence".

In the future, the complex is planned to be added to the functional unit: view available courses for a student with a short description and a schedule; dialogues "student-teacher" and dialogue between the course teacher and all students of the course; assessment of the acquired course material by the tasks of the closed (tests) and open type (using neural networks).

**Conclusion**

The implementation of self-sustained work with the use of informational educational environments contributes to the formation of students' self-sustainability, facilitates the acquisition of knowledge, skills development, and the integration of traditional and informational learning technologies. The effectiveness of the use of EEMC in many cases depends on the successful solving of methodological problems associated with its use in the training process.

EEMC allows organizing the planning, cognitive, organizational and methodically directed activities of students, aimed at achieving the result: the introduction of a certain discipline, which is carried out by students themselves without the direct support of the teacher in support of its ICT.

The developed electronic teaching-methodical complex of discipline includes two types of users. For the complete functioning of the complex a database is created. The architecture of a web resource fully meets the requirements of the learning process.

In the teaching-methodical complex provides assessment and assistance in the studied subject.

REFERENCES

1. Kuznetsova N.M. Electronic educational and methodical complex as a means of improving the pedagogical process of refresher courses / N.M. Kuznetsova // Application of information and communication technologies in education: VI All-Russian scientific practical Conf., May 20–21, 2009: theses of the reports. –Yoshkar-Ola, 2009. – p. 33– 37.
2. Vasiukevich V.V. Introduction of electronic educational and methodological complexes in the disciplines in the educational practice of the university: [module-rating training] / V. V. Vasiukevich // Innovations in education. – 2010. – №2. – pp. 39–55.
3. Ambrosenko N.D. Development of the electronic educational-methodical complex: method. recommendations /

- N.D. Ambrosenko, O.G. Malysheva, S.O. Potapova, VA Filkin // Krasnoyarsk state agrar un.–Krasnoyarsk, 2008. –35 p.
4. Tatarintsev A.I. Electronic educational and methodical complex as a component of the informational and educational environment of the pedagogical university / AI Tatarintsev // Theory and practice of education in the modern world: materials internationally. behind scientific conf. (St. Petersburg, February 2012). – St. Petersburg: Renome, 2012. –p. 367–370.
  5. Gurevich R.S. Innovative technologies of education in the conditions of informatization of education / R.S. Gurevich, M. M. Kozyar, M.Yu. Kademiya, L.S. Shevchenko // NAPNUkraine R S. Gurevich. – Lviv: LBU, 2015 –396 pp.
  6. Fedorchuk I.I. New information technology learning, distance education: the realities of today and prospects of development / I.I. Fedorchuk, I.P. Fedorchuk // Modern information technologies and innovative methods of training in the training of specialists: methodology, theory, experience, problems. – K.:Vinnytsya: "Vinnytsya", 2002. – № 1 –p. 515–520.
  7. Efremov O.V. Information systems in science, education and business / O.V. Efremov, P.S. Belyaev. Available online: <http://www.5byte.ru/book/1/0010.php>
  8. Goryunov V. S. Information systems in education // Young Scientist. – 2010. – №5. –p. 159–161. Available online: <https://moluch.ru/archive/16/1540/> (appeal date: 04/05/2019).
  9. Donets, V., Kuchuk, N. and Shmatkov, S. (2018), “Development of software of e-learning information system synthesis modeling process”, *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No 2, pp. 117–121, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>
  10. Zykov, I.S., Kuchuk, N.H. and Shmatkov S.I. (2018), “Synthesis of architecture of the computer transaction management system e-learning”, *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 60-66, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>
  11. Yoon S.A. Teaching and Learning About Complex Systems in K–12 Science Education: A Review of Empirical Studies 1995–2015 / S.A. Yoon, S.E. Goh & Park M. // *Review of Educational Research*, 2018. – № 88(2). – p. 285–325. Available online: <https://doi.org/10.3102/0034654317746090>.

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. О. В. Шефер,

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Полтава

Received (Надійшло) 15.07.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

#### **Розробка інформаційної системи електронного навчально-методичного комплексу дисципліни**

А. А. Гаврилишин, Т. А. Дмитренко, Т. Н. Деркач, А. А. Дмитренко

У даній статті розглянуто здійснення самостійної роботи студентів закладу вищої освіти на основі використання електронних навчально-методичних комплексів як складової інформаційного освітнього середовища навчального закладу, структура, переваги та недоліки його використання в навчальному процесі. Визначено структуру електронного навчально-методичного комплексу як повноцінної складової сучасного навчального процесу і критеріїв щодо його створення. Проведено аналіз та надано характеристику існуючих навчальних інформаційних систем та електронних навчально-методичних комплексів. Надано перелік навчальних продуктів які включені в структуру електронного навчально-методичного комплексу дисципліни. Представлено розробку електронного навчально-методичного комплексу, сферу застосування і використання. Представлені діаграми варіантів використання для окремих видів користувачів. Передбачено введення в систему двох видів користувачів. Розкрито функції та принципи основних компонентів сервісу, які дозволяють організувати плануючу, пізнавальну, організаційну і методично спрямовану діяльність студентів, що орієнтована на досягнення результату: володіння певною навчальною дисципліною, котра здійснюється студентами самостійно без прямої підтримки викладача за умов підтримки її інформаційно-комунікаційними технологіями. Представлено розроблену базу даних, яка дозволяє повноцінно функціонувати навчально-методичному комплексу. Визначено основні переваги та недоліки існуючих навчальних інформаційних систем. Акцентовалась увага на питанні оцінки якості результатів навчання.

**Ключові слова:** електронний підручник, електронний навчально-методичний комплекс, інформаційні технології, інформаційне середовище, навчальний процес.

#### **Разработка информационной системы электронного учебно-методического комплекса дисциплины**

А. А. Гаврилишин, Т. А. Дмитренко, Т. Н. Деркач, А. А. Дмитренко

В данной статье рассмотрены возможности самостоятельной работы студентов ЗВО на основе использования электронных учебно-методических комплексов как составляющей информационной образовательной среды учебного заведения, структура, преимущества и недостатки его использования в учебном процессе. Определена структура электронного учебно-методического комплекса как полноценной составляющей современного учебного процесса и критериев его создания. Проведен анализ и охарактеризованы существующие учебные информационные системы и электронные учебно-методические комплексы. Дан перечень учебных продуктов, которые включены в структуру электронного учебно-методического комплекса дисциплины. Представлен разработанный электронный учебно-методический комплекс, сфера его применения и использования. Представлены диаграммы вариантов использования для отдельных видов пользователей. Предусмотрено введение в систему двух видов пользователей. Раскрыты функции и принципы основных компонентов сервиса, которые позволяют организовать плановую, познавательную, организационную и методическую направленность деятельности студентов, которая ориентируется на достижение результата: усвоение определенной учебной дисциплины, которая осваивается студентами самостоятельно без прямой поддержки преподавателя по условиям поддержки ее информационно-коммуникационными технологиями. Представлена разработанная база данных, которая позволяет полноценно функционировать учебно-методическому комплексу. Определены основные преимущества и недостатки существующих учебных информационных систем. Акцентировалось внимание на вопросе оценки качества результатов обучения.

**Ключевые слова:** электронный учебник, электронный учебно-методический комплекс, информационные технологии, информационная среда, учебный процесс.

A. Hafiak, O. Shefer, E. Borodina, S. Alyoshin

Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

## FORMATION OF PROFESSIONAL COMPETENCE OF FUTURE IT SPECIALISTS IN INSTITUTIONS OF HIGHER EDUCATION

The paper considers modern information technologies, which are the basis of the process of informatization of education. The process of improving the quality of training specialists in the context of developing a system of general and vocational education is researched. The author analyzes the definition of informational educational environment. It is substantiated that online education is a factor in increasing the level of access to education and has certain advantages over traditional types of knowledge, providing flexibility through remote access to resources. Modern European educational initiatives are analyzed, informatization of education envisages development of informational and educational environment, essential role in creation of which is educational television. It is determined that today in the field of development of the information and telecommunication environment the main channels of data transmission, owned both by the state and non - state structures, which provide high - speed exchange of large flows of information between regions, are developing.

**Keywords:** information technologies, pedagogical innovations, software tools, innovative teaching methods, applied software.

### Introduction

Modern information technologies are the basis of the process of informatization of education, the implementation of which assumes: Improving the quality of learning through more complete use of available information. Improving the effectiveness of the learning process on the basis of its individualization and intensification; development of perspective means, methods and technologies of training with the focus on developing, out-of-the-box and personalized education.

With the help of the project, European Education Initiatives will be able to provide young people with the popularity and popularity of IT-related companies: C # .NET Developer; JAVA Developer; Frontend Developer; Full stack Developer (Frontend + Backend); Game Developer; PHP Developer. The use of the information system in the learning process allows not only to give students information about the object of management, but also helps them to understand all the diversity and complexity of relationships typical of real enterprises, to trace the dynamics of these relationships when changing external and internal factors, and also to destroy the interdisciplinary barriers formed by students due to the time sequence of the presentation of educational subjects. Such a toolkit makes it possible to construct modern educational technologies that involve the formation of extraordinary thinking by students, a creative approach to management.

Today, one of the characteristic features of the educational environment is the ability of students and teachers to turn to structured teaching materials, educational multimedia complexes throughout the university at any time and at any point in the space. In addition to the availability of educational material, it is necessary to ensure who is trained to communicate with the teacher, obtaining consultations in on-line or off-line modes, as well as the possibility of obtaining an individual "navigation" in mastering a particular subject.

Modern European educational initiatives are analyzed, informatization of education envisages development of informational and educational environment, essential role in creation of which is

educational television. It is determined that today in the field of development of the information and telecommunication environment the main channels of data transmission, owned both by the state and non - state structures, which provide high - speed exchange of large flows of information between regions, are developing.

### Main part

Modern information technologies are the basis of the process of informatization of education, the realization of which implies: improving the quality of learning through the full use of available information; increasing the effectiveness of the learning process based on its individualization and intensification; development of perspective means, methods and technologies of education with an orientation towards developing, advanced and personalized education; achievement of the necessary level of professionalism in mastering the means of computer science and computer technology; integration of different types of activities (educational, educational, research, methodological, scientific, organizational) within the framework of a unified methodology based on the application of information technologies [5-7].

According to the "European Educational Initiative Project", posted on the website of the Ministry of Education and Science of Ukraine, starting in January 2016, a European Education Initiative project is being implemented in Ukraine. The project is aimed at developing IT-education and integrating the best international practices into the system of training IT-specialists. The goal of the project is to provide everyone with high-quality modern education in the field of information technology, to help IT-specialists to be competitive and guaranteed employment. With the help of the project, European Education Initiatives will be able to provide young people with the popularity and popularity of IT-related companies: C # .NET Developer; JAVA Developer; Frontend Developer; Full stack Developer (Frontend + Backend); Game Developer; PHP Developer [2, 3].

In Ukraine, for a fairly short period, there have been cardinal transformations, in place of the traditional



system of education, a system comes into existence, which has a setup for the formation and formation of a well-developed, creative person, capable of easily adapting to constantly changing environmental conditions, orienting in the flow of information, continuous but self-development [4, 6, 7].

It should be noted that European educational initiatives - a joint project of the Council for the competitiveness of the industry of ICT (ICT), leading companies of the IT industry and training centers of commercial information technology, implemented with the support and in partnership with the Committee of the Verkhovna Rada of Ukraine on Science and Education, the Ministry of Education and Science of Ukraine. The Industry Competitiveness Council (ICC) is an all-Ukrainian public organization that since 2012 has united companies of information and communication technology industry, training centers for commercial information technologies, higher educational institutions and government officials in order to create the competitiveness of the domestic ICT industry.

The website of the Ministry of Education and Science of Ukraine contains professional standards for the training of future IT industry professionals, including: product manager in the field of informational technologies; Project Manager in Information Technology; specialist in information resources; specialist in information systems; specialist in software development [2, 3, 5, 7].

Distant education (DE) has been developing for a long time in parallel with the development of the Internet, and recently, a breakthrough in the field of the new approach to learning - mass online courses has occurred in this area (Fig. 1).

The use of the information system in the learning process allows not only to give students information about the object of management, but also helps them to

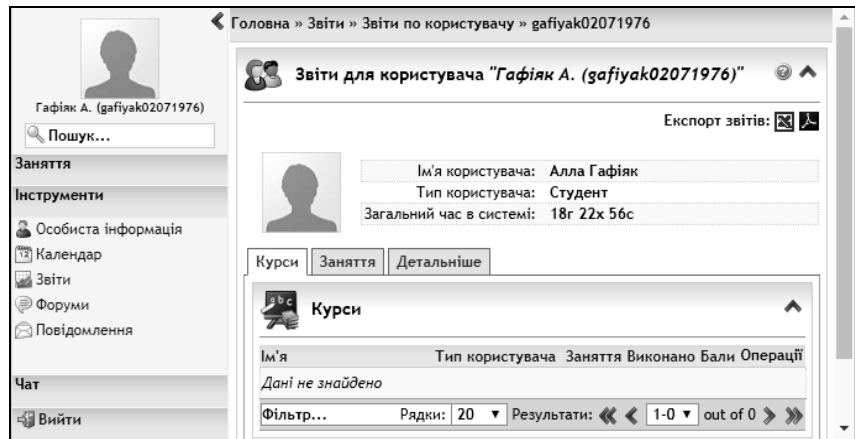


Fig. 1. Remote resource of the Central Institute of Postgraduate Pedagogical Education of the State University" University of Management Education

understand all the diversity and complexity of relationships typical of real enterprises, to trace the dynamics of these relationships when changing external and internal factors, and also to destroy the interdisciplinary barriers formed by students due to the temporary sequence of presentation of educational subjects. Such a toolkit makes it possible to construct modern educational technologies that involve the formation of extraordinary thinking by students, a creative approach to management (Fig. 2).

Distant methods already have an impact on institutions of higher education in Ukraine, and this influence will increase. Leading universities of the country are actively introducing DN technologies, responding to the demand from people living far, including abroad.

Today, one of the characteristic features of the educational environment is the ability of students and teachers to turn to structured teaching materials, educational multimedia complexes of the entire university at any time and at any point in space. In addition to the availability of educational material, it is necessary to provide the learner with the opportunity to communicate with the teacher, get advice online or offline, as well as the possibility of obtaining individual "navigation" in mastering a particular subject.

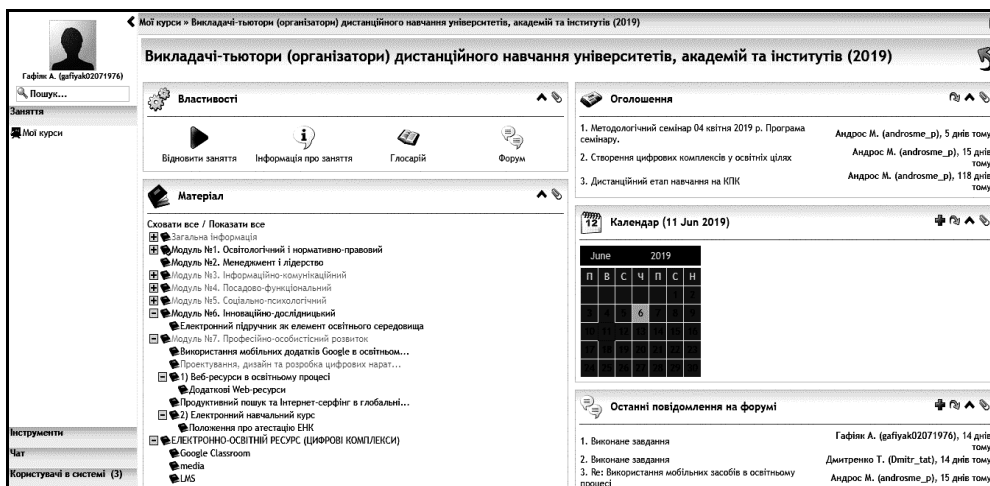


Fig. 2. Remote resource of the Central Institute of Postgraduate Pedagogical Education of the State University" University of Management Education

One of the definitions of the informational educational environment is formulating its understanding as an information system, which combines with network technologies, software and hardware, organizational, methodological and mathematical support, designed to increase the efficiency and accessibility of the educational process of training specialists. In addition to the availability of educational material, it is necessary to ensure who is trained to communicate with the teacher, obtaining consultations in on-line or off-line modes, as well as the possibility of obtaining an individual "navigation" in mastering a particular subject.

## Conclusions

Modern European educational initiatives are analyzed, informatization of education envisages development of informational and educational environment, essential role in creation of which is educational television. It is determined that today in the field of development of the information and telecommunication environment the main channels of data transmission, owned both by the state and non - state structures, which provide high - speed exchange of large flows of information between regions, are developing.

## REFERENCES

1. Symonenko N.N. Management of educational services using innovative teaching methods / N.N. Symonenko // Pacific State University Bulletin. – 2012. – № 2. – P. 201–206.
2. About the Concept of the National Program of Informatization: Law of Ukraine from 04.02.1998 № 75/98-BP // Verkhovna Rada of Ukraine. – 1998, № 27–28, Art. 182
3. I.Yu. Khomyshyn Principle of education's informatization in the conditions of globalization of society // [Electronic resource]. - Access mode: file:///C:/Users/ASUS/Downloads/vnulpurn\_2016\_850\_21%20(1).pdf
4. A. Hafiak A. Application of genetic programming tools as a means of solving optimization problems/ A. Hafiak, E. Borodina, A. Diachenko-Bohun // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2018 – Вип. 6(52). – С. 58–60. – doi: 10.26906/SUNZ.2018.6.058
5. E. Borodina Areas of application programming languages python and ruby / Borodina E.A., Alyoshin S.P., Hafiak A.M., Smislov S.O., Sapsay E.V. // Modern engineering and innovative technologies. Issue 7. Part 3. Sergeieva&Co LuBstr. 13 76227 Karlsruhe, Germany – P. 74- 77. DOI: 10.30890/2567-5273.2019-07-03-050
6. S.P. Alyoshin Developing q-orca site backend using various python programming language libraries. / Alyoshin S.P., Borodina E.A., Hafiak A.M., Zhabran I.B., Kikot A.S. // Modern engineering and innovative technologies. Issue 7. Part 3. Sergeieva&Co LuBstr. 13 76227 Karlsruhe, Germany – P. 48- 53. DOI: 10.30890/2567-5273.2019-07-03-021
7. Hafiak A. Information technology as a component of improving the training quality future specialists in higher education institutions / Hafiak A., Yastreba S., Nosach O., Borodina E. I // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2019 – Вип. 2(54). – С. 60–65. – doi: 10.26906/SUNZ.2019.2.060

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. Л. І. Леві,  
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Полтава  
Received (Надійшла) 15.07.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

### Формування професійної компетентності майбутніх ІТ-фахівців у закладах вищої освіти

А. М. Гафіяк, О. В. Шефер, О. О. Бородіна, С.П. Альошин

Розглянуто сучасні інформаційні технології, що є основою процесу інформатизації освіти. Досліджено процес підвищення якості підготовки фахівців у контексті розвитку системи загальної та професійної освіти. Проаналізовано визначення інформаційного освітнього середовища. Обґрунтовано, що онлайн-навчання є чинником підвищення рівня доступності освіти і має певні переваги перед традиційними формами отримання знань, забезпечуючи гнучкість через віддалений доступ до ресурсів. Аналізуються сучасні європейські освітні ініціативи, інформатизація освіти передбачає розвиток інформаційно-освітнього середовища, істотну роль у створенні якого відіграє освітнє телебачення. Визначено, що сьогодні у сфері розвитку інформаційно-телекомунікаційного середовища розвиваються основні канали передачі даних, що належать як державним, так і недержавним структурам, що забезпечують швидкісний обмін великими потоками інформації між регіонами.

**Ключові слова:** інформаційні технології, педагогічні інновації, програмні засоби, інноваційні методи навчання, прикладне програмне забезпечення.

### Формирование профессиональной компетентности будущих ИТ-специалистов в учреждениях высшего образования

А. М. Гафияк, А. В. Шефер, Е. А. Бородина, С. П. Алёшин

Рассмотрены современные информационные технологии, что являются основой процесса информатизация образования. Исследован процесс повышения качества подготовки специалистов в контексте развития системы общего и профессионального образования. Проанализированы определения информационной образовательной среды. Обосновано, что онлайн-обучения является фактором повышения уровня доступности образования и имеет определенные преимущества перед традиционными формами получения знаний, обеспечивающие гибкость через отдаленной доступ к ресурсам. Анализируются современные европейские образовательные инициативы, информатизация образования предполагает развитие информационно-образовательной среды, существенную роль в создании которого играет образовательное телевидение. Определено, что сегодня в сфере развития информационно-телекоммуникационной среды развиваются основные каналы передачи данных, принадлежащих как государственным, так и негосударственным структурам, которые обеспечивают скоростной обмен большими потоками информации между регионами.

**Ключевые слова:** информационные технологии, педагогические инновации, программные средства, инновационные методы обучения, прикладное программное обеспечение.

В. О. Гороховатський<sup>1</sup>, С. В. Гадецька<sup>2</sup>, Р. П. Пономаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

## ЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ ЗАДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ НА ПІДСТАВІ ФОРМУВАННЯ СТАТИСТИЧНОГО ЦЕНТРУ ОПИСУ

**Предметом** досліджень є моделі для класифікації зображень у просторі описів як множини дескрипторів ключових точок при розпізнаванні візуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору. **Метою** є розвинення структурного методу класифікації шляхом впровадження логічного оброблення даних із використанням ймовірнісного розподілу у вигляді статистичного центру. **Завдання:** розроблення математичних та програмних моделей для обчислення релевантності описів зображень із використанням логічного аналізу, вивчення властивостей, варіантів застосування, значень параметрів моделей, оцінювання результативності за наслідками оброблення експериментальної бази зображень. Застосовуваними **методами** є: детектор BRISK для формування дескрипторів ключових точок, інтелектуальний аналіз даних, математична статистика, засоби визначення релевантності для множин даних, програмне моделювання. Отримані **результати:** ефективність способу класифікації на основі логічного аналізу з використанням статистичних центрів залежить від відстаней між центрами еталонів бази. Застосування логічного аналізу спрощує оброблення і підвищує швидкодію класифікації. Найкращі результати щодо класифікації окремих дескрипторів показав підхід з використанням уточнених центрів. Використання концентрованої частки даних опису дає можливість ретельніше зосередитися на його відмінностях з іншими описами. **Висновки.** **Наукова новизна** – удосконалення методу класифікації зображень на основі впровадження логічного аналізу на підставі статистичного центру опису, що дає можливість модифікувати склад опису зі збереженням властивостей об'єктів в аспекті результативної класифікації. **Практична значущість** роботи полягає у досягненні прийнятого рівня ефективності класифікації за визначеною моделлю релевантності, підтвердженні працездатності запропонованих модифікацій оброблення даних на прикладах зображень, розробленні програмних моделей для впровадження описаних методів класифікації у системах комп'ютерного зору.

**Ключові слова:** структурні методи класифікації зображень, ключова точка, детектор BRISK, дескриптор, статистичний центр, концентрований опис, логічний аналіз, релевантність описів, результативність класифікації, агрегований образ.

### Вступ

Суть технологій інформаційного пошуку у системах комп'ютерного зору полягає у аналізі, ідентифікації, відборі та відображенні візуальних даних відповідно до інформації визначеного запиту. Основний критерій результативності при цьому – стабільне забезпечення об'єктивного оцінювання релевантності виявлених візуальних даних стосовно системи фіксованих еталонних образів [1-8]. Багатовимірність природи візуальної інформації часто не дає можливості її безпосередньо аналізувати чи класифікувати, що викликає необхідність розроблення спрощених підходів на підставі розбиття даних на блоки чи компоненти [2, 3, 9]. У структурних методах розпізнавання візуальних об'єктів за описом у вигляді множини ключових точок (КТ) багатовимірність даних визначається як розміром окремого дескриптора зображення (вектор до 512 компонентів), так і кількістю КТ у описі (100-500). Тому підходи щодо спрощення оброблення даних опису шляхом їх проектування або розбиття на фрагменти суттєво зменшують обчислювальні витрати [10].

Продуктивною ідеєю є подання даних опису кластерною моделлю, що скорочує обчислення у сотні разів [11]. Ідеальним варіантом для результативної класифікації є випадок, коли візуальний об'єкт у просторі значень його дескрипторів може бути поданий єдиним кластером, хоча більш реальною все-таки вважаємо модель подання множини дескрипторів кількома (3...5) кластерами [12]. Важливим критерієм при цьому є забезпечення валідності даних, тобто відповідності використаної моделі даних результати-

вному вирішенню прикладної задачі [13]. У відомих методах класифікації на базі структурного опису зображення, за виключенням традиційного підходу голосування КТ типу «множина-множина», вивчається два основних підходи: шляхом обчислення відстані у просторі інтегрованих ознак для опису [14, 15], а також безпосередня класифікація окремих дескрипторів до класу на підставі деякого «центру опису» [10, 11]. По-елементний аналіз опису розпізнаваного об'єкту на предмет еквівалентності його елементів з образом зразку є менш вимогливим до дії завад на зображенні, але потребує більш досконалого аналізу.

**Метою статті** є розвинення структурного методу класифікації зображень шляхом впровадження логічного оброблення даних із використанням ймовірнісного розподілу у вигляді статистичного центру для опису як множини дескрипторів.

Задачами дослідження є розроблення математичних та програмних моделей задля обчислення релевантності описів зображень із використанням логічного аналізу, вивчення властивостей, варіацій застосування, значень параметрів моделей, оцінювання результативності за наслідками оброблення експериментальної бази зображень.

### 1. Побудова простору ознак

Нехай  $B^n$  – векторний простір, що містить вектори розмірності  $n$  з бінарними значеннями, потужність множини  $B^n$  дорівнює  $card B^n = 2^n$ . Будемо ототожнювати простір  $B^n$  із множиною дескрипторів – векторів, побудованих детектором ключових точок (КТ) зображення [14-16].

Розглянемо фіксовану скінченну підмножину  $Z \subset B^n$  бінарних векторів, яку складає опис аналізованого зображення у вигляді набору дескрипторів КТ. Загалом  $Z$  можна вважати мультимножиною, так як її елементи можуть повторюватися або бути достатньо подібними між собою. Таке подання сприяє представленню візуального об'єкта як сукупності його структурних елементів, а значення кожного дескриптора є результатом екстрагування значущих ознак окремих просторових фрагментів зображення. Предметно фіксовану множину  $Z = \{z_v\}_{v=1}^s$ ,  $z_v \in B^n$ , складають  $s$  дескрипторів КТ із бінарними значеннями, наприклад, сформованих детекторами ORB, BRISK, AKAZE [16].

Для фіксованого значення  $n$  і конкретної послідовності із  $s$  дескрипторів КТ розглянемо  $Z$  у структурованій формі бінарної матриці  $D = \{d_{i,j}\}_{i=1}^s \}_{j=1}^n$ . Для спрощення вважаємо значення  $s$  однаковим для всіх еталонів, скінченна сукупність яких загалом представляє розпізнавані класи зображень об'єктів [14, 15].

Припустимо, що для кожного структурного опису як множини дескрипторів КТ властиве компактне її розміщення навколо деякого центру у векторному просторі  $B^n$ . Розширимо можливості аналізу, допустивши належність шуканого центру до множини  $R^n$  векторів розмірності  $n$ , область визначення компонентів яких складає значення відрізка  $[0, \dots, 1]$ . Це дає можливість для наявних даних оцінити допустиму межу для відстані в межах околу визначеного центру і далі на підставі встановленого порогу для відстані від центру здійснити класифікацію довільного опису шляхом обчислення кількості його еквівалентних елементів та вказаного центру. Зрозуміло, що у аспекті багатокласової класифікації результативність такого способу природно залежить від того, наскільки визначені центри відрізняються між собою у застосованому просторі ознак. Будемо трактувати послідовність бітів кожного з дескрипторів  $z_v$ , що є рядком матриці  $D$ , як поодинокі відліки  $n$  - вимірного дискретного сигналу. За описом  $Z$  тепер побудуємо агрегований образ  $h(Z)$  деякого «центру» даних у формі векторної моделі:

$$h(Z) = (h_1, \dots, h_j, \dots, h_n), \quad h_j = \sum_{i=1}^s d_{i,j}, \quad (1)$$

де  $h_j$  – суми елементів  $D$  за стовпцями.

Назвемо вектор  $h(Z)$  статистичним центром (СЦ) опису і покладемо його в основу класифікації. Важливим для реалізації процедур розпізнавання за вектором  $h(Z)$  є те, що подання  $h(Z)$  не залежить від порядку слідування дескрипторів  $z_v$  у множині  $Z$ , тобто модель  $h(Z)$  є інваріантною до перемішування дескрипторів у складі опису, що відповідає довільному розміщенню рядків у матриці  $D$ . Фактично вектор  $h(Z)$  – це узагальнений образ візуального об'єкта у  $n$  - мірному просторі  $C^n$  векторів з цілими невід'ємними компонентами, так як

$h(Z) \in C^n$ ,  $h_j \geq 0$ . Діапазон значень  $h_j$  як складових  $h(Z)$  визначається безпосередньо процедурою обчислення та числом дескрипторів  $s$ , його можна вважати заданим:  $h_j \in \{0, 1, \dots, s-1, s\}$ . Наряду з поданням  $h(Z)$  опису будемо також мати на увазі нормоване подання  $h^s(Z) = (h_1^s, h_2^s, \dots, h_s^s)$ , де  $h_i^s = h_i / s$ , що отримане нормуванням значень  $h_i$  на число дескрипторів  $s$  опису, причому  $h_i^s \in R^1$ ,  $h_i^s \in [0, 1]$ ,  $R^1$  – простір дійсних чисел на відрізку  $[0, 1]$ . Вектори  $h$  та  $h^s$  можна віднести до апостеріорних характеристик опису.

## 2. Класифікація з використанням статистичного центру опису

Поставимо завдання шляхом здійснення статистичного аналізу даних бінарної матриці  $D$ , що має сенс зразку, на підставі значень векторів  $h$  чи  $h^s$  установити логічну процедуру щодо визначення істинності запиту про приналежність довільного бінарного вектору  $b \in B^n$  до заданого опису  $Z$ .

**2.1. Класифікація за порогом для відстані до «центру» опису.** На етапі попереднього оброблення даних обчислимо  $q_i = \rho(h^s, z_i)$ ,  $i = \overline{1, s}$ , де  $\rho(h^s, z_i)$  – деяка відстань між вектором  $h^s$  та окремим дескриптором  $z_i \in Z$ . Діапазон значень відстані  $\rho(h^s, z_i)$  відомий, так як простір порівнюваних векторів визначений метрикою та значенням даних. Наприклад, для манхеттенської відстані  $\rho(h^s, z_i) = \sum_{v=1}^n |h^s(v) - z_i(v)|$  його значення для такого типу даних належать відрізку  $[0, n]$ . Здійснимо ранжирування значень відстаней  $q_i$  до виду  $q_1 \leq q_2 \leq \dots \leq q_s$ , виберемо із відсортованої послідовності значення  $q_{s/2}$ , що знаходиться в центрі ранжируваної вибірки.

Оберемо величину  $\alpha = q_{s/2}$  у якості порогу  $\alpha$  для відстані  $\rho(h^s, z_i)$  задля класифікації запиту як довільного вектору  $b$  до множини  $Z$ . Такий вибір значення порогу  $\alpha$  забезпечує еквівалентність у межах значення відстані  $\alpha$  для більшості векторів заданого опису  $Z$  і його інтегрованої характеристики  $h(Z)$ , тобто виконання умови  $\rho(h^s, z_i) \leq \alpha$ . Замість відстані  $\rho$  у такому способі вибору порогу можна використовувати також одну із мір подібності, наприклад, скалярний добуток векторів  $\gamma(h^s, z_i) = \sum_{v=1}^n h^s(v)z_i(v)$ , діапазон значень яких теж повністю визначений.

Обчислення порогу  $\alpha$  шляхом переміщення по відсортованій вибірці вліво чи вправо від середини дає можливість додаткової адаптації до даних та може сприяти надійнішій класифікації.

За виділеною граничною множиною дескрипторів визначимо уточнений центр  $h^{s*}$ , який обчис-

люється за формулою (1) шляхом додавання та подальшого усереднення значень тільки тих дескрипторів опису, для яких виконана умова  $\rho(h^s, z_i) \leq \alpha$ :

$$h^{s*} = \sum_{i=1}^s z_i \chi(z_i) / s^*, \quad (2)$$

$$\chi(z_i) = \begin{cases} 1, & \rho(h^s, z_i) \leq \alpha, \\ 0, & \rho(h^s, z_i) > \alpha, \end{cases}$$

де  $s^*$  – число дескрипторів,  $\chi(z_i)$  – характеристична функція за результатом логічного аналізу.

Уточнений СЦ  $h^{s*}$  можна застосувати для класифікації дескрипторів довільного опису. Виділена концентрована частина даних опису у вигляді уточненого центру (2) дає можливість ретельніше виявити властивості зосередження його даних у аспекті відмінностей з іншими описами.

Схематично класифікацію за величиною порога  $\alpha$  для двох класів у представимо на рис. 1. Бачимо, що елементи, які належать околу центру першого класу, можуть одночасно належати до другого класу, і навпаки. Обидві площі цих сегментів для аналізованих даних визначають обсяг помилкових рішень при класифікації. До обох цих підмножин помилкових рішень належить перетин околів центрів, заштрихований на рис. 1, він на пряму вказує число їх спільних елементів. Чим більший перетин, тим гірше розрізняються множини елементів різних класів.

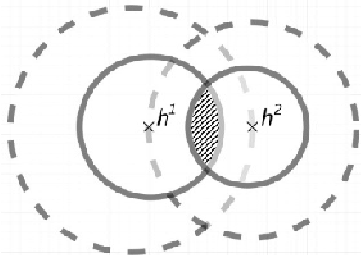


Рис. 1. Схема класифікації для двох класів: суцільна лінія – межа околу, пунктирна – межа класів

За вказану схему результат класифікації не є симетричним: число елементів першого класу, помилково віднесене до другого, не дорівнює числу елементів другого класу, віднесених до першого. Зрозуміло, що зі зменшенням відстані між центрами кількість елементів з помилковою класифікацією зростає, так як збільшується площа перетину околів і площа, що визначає належність іншому класу.

Загалом класифікація з використанням СЦ для бази зображень може бути представлена такими етапами оброблення: 1) попередній аналіз кожного з описів еталонів бази задля визначення СЦ та порогу для класифікації дескрипторів за відстанню до нього; 2) аналіз множини дескрипторів об'єкта на предмет задоволення нерівності  $\rho(h^s, z_i) \leq \alpha$  відносно кожного із еталонів; 3) підрахунок числа голосів дескрипторів, віднесених до кожного з еталонів; 4) визначення еталону з найбільшою кількістю голосів.

**2.2. Аналіз даних за структурою множини бітів.** Застосуємо структурування даних, визначивши

для кожного із бітів опису  $Z$  (окремо чи для усіх бітів загалом) деякий поріг  $\alpha_b$  для віднесення поодинокого біту вектора  $b$  до цього опису шляхом встановлення граничного ступеня його близькості з відповідним значенням для компоненти векторів  $h$  чи  $h^s$ . Цей поріг  $\alpha_b$  можна обчислити на підставі квантилю для числових значень  $h^s$  опису  $Z$ , виходячи із діапазону зміни його значень. Число дескрипторів опису, біти яких у межах квантилю еквівалентні відповідним бітам статистичного центру, можуть характеризувати міру «згуртованості» елементів опису навколо центру. Важливим показником також є число бітів, які задовольняють умові еквівалентності. Поріг  $\alpha_b$  можна вибрати так, щоб число еквівалентних бітів перевищувало половину від загального числа бітів. А класифікаційне правило для окремого дескриптора може бути засноване на умові перевищення числа еквівалентних бітів. Такою процедурою вибираються дескриптори, які за значенням звуженої кількості бітів є наближеними до СЦ. На їх підставі можна сформувати уточнений центр (2).

З іншого боку, зважаючи на бінарний тип аналізованих даних, класифікаційне правило в обчислювальному аспекті може бути достатньо просто реалізовано як встановлення еквівалентності дискретизованого значення  $h_i^s$  та біту  $b_i$ : якщо біт  $b_i = 1$ , в той же час  $h_i^s \geq 0,5$ , а також у випадку  $b_i = 0$  одночасно з  $h_i^s < 0,5$  еквівалентність можна вважати визначеною. Загалом правило  $\gamma(h_i^s, b_i)$  встановлення близькості  $h_i^s$  та  $b_i$  зводиться до перевірки істинності булевої функції виду

$$\gamma(h_i^s, b_i) = Pr[(b_i = 1) \& (h_i^s \geq 0,5); \vee (b_i = 0) \& (h_i^s < 0,5)], \quad (3)$$

що приймає значення 1 у випадку істинності предикату  $Pr$ , що перевіряє виконання вказаних логічних умов. Ще простіше функція  $\gamma(h_i^s, b_i)$  може бути побудована на підставі попередньої бінаризації значень  $h_i^s$ , що зводиться до обчислення логічної функції підрахунку кількості однакових бітів.

На підставі визначеного порогу для бітів чи задоволення логічного висновку класифікація довільного вектора  $b \in B^n$  реалізується як підрахунок числа бітів, значення яких лежать у межах порогу чи відповідають логічній умові. Якщо число таких бітів більше  $n/2$ , то вектор  $b$  може бути віднесений до опису  $Z$ . Суть обох розглянутих способів полягає у побудові деякого околу точки – центра даних еталону у багатовимірному просторі з метою віднесення до нього всіх векторів, що знаходяться всередині околу. Перший спосіб визначає окіл на підставі значення відстані до центру, а другий – на підставі числа компонентів вектору, що належать околу. Другий спосіб встановлює більш жорсткі рамки для значень вектору даних.

**2.3. Класифікація за визначенням релевантності центрів описів.** На підставі сформованих СЦ еталонних описів як векторів  $h$  (чи  $h^s$ ) їх релевантність з аналізованим описом довільного об'єкту також можна визначити безпосередньо за відстанню

$$\rho(h^1, h^2) = \sum_{v=1}^n |h^1(v) - h^2(v)|, \quad (4)$$

де  $h^1, h^2$  – центри описів.

Зважаючи на апріорно відомі діапазони значень даних, за якими визначається  $\rho(h^1, h^2)$ , можна оцінити рівень значущості для релевантності задля реалізації класифікаційного рішення. Релевантність можна оцінити також за скалярним добутком СЦ описів

$$\gamma(h^1, h^2) = \sum_{v=1}^n h^1(v)h^2(v) \quad (5)$$

Чим більше значення (5) у межах  $[0, 512]$ , тим більша подібність описів.

### Результати експериментальних досліджень

Нами здійснено програмне моделювання запропонованих методів аналізу даних структурних описів мовою C# у середовищі Visual Studio 2017 із використанням засобів бібліотеки Open CV [14, 15, 17]. Для проведення досліджень вибрані зображення (рис. 2), для яких обчислені структурні описи з використанням детектора BRISK (параметри  $s = 176$ ;  $n = 512$ ), околиці КТ на рис. 1 зображені у вигляді невеликих кілець. Перші два зображення візуально досить схожі між собою («ангел та демон»), що завжди викликає труднощі при розпізнаванні навіть людським зором.

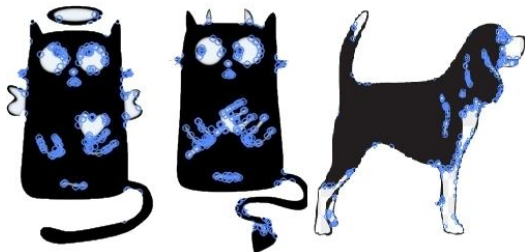


Рис. 2. Зображення з околицями КТ

Обчислені манхеттенські відстані (4) між статистичними центрами  $h(i)$  ( $i$  – номер) зображень рис. 2 мають такі значення:  $\rho(1,2) = 23$ ,  $\rho(1,3) = 44$ ,  $\rho(2,3) = 37$ , що загалом вказує на суттєву подібність між собою значень описів у досліджуваному просторі ознак СЦ, так як усі значення відстані у нашому прикладі лежать на інтервалі  $[0, 512]$ . Відповідні нормовані значення складають  $\rho^*(1,2) = 0,044$ ,  $\rho^*(1,3) = 0,085$ ,  $\rho^*(2,3) = 0,072$ . У той же час, як бачимо, навіть візуально схожі зображення 1 та 2 є можливість розрізнити за значенням (4). При обчисленні уточнених центрів (2) на підставі порогу для половини числа дескрипторів отримано:

$$\rho^*(1,2) = 0,052, \quad \rho^*(1,3) = 0,087, \quad \rho^*(2,3) = 0,076,$$

тобто ступінь розрізнення між СЦ очевидно збільшилась. Це свідчить про певне покращення ефекти-

вності класифікації. Отримана кількість числа голо- сів елементів еталонів, що віднесені до відповідного класу (рис. 2) шляхом порівняння їх відстані до уточненого центру з граничною, показана у табл. 1.

Таблиця 1 – Кількість класифікованих елементів опису еталонів

Номер класу	1	2	3
1	44	29	11
2	36	44	20
3	32	27	44

Як бачимо, значення числа голосів на діагоналі табл. 1 суттєво перевищують величини у рядку та стовпці, що підтверджує працездатність та результативність роботи методу при класифікації окремих дескрипторів. Схожі зображення 1 та 2, як бачимо, при цьому теж успішно розрізняються. Таким чином, формування концентрованої підмножини (кластеру) опису та уточненого СЦ (2) забезпечує хорошу результативність логічного оброблення.

Нами виконано обчислення відстаней між центрами для випадку, коли дескриптори розміром 512 подано у вигляді вектору 128 десяткових цілих чисел, де кожна компонента є значенням 4-х бітів дескриптора та приймає значення у діапазоні  $0, \dots, 15$ . Максимальна відстань (3) для цього випадку складає  $128 \cdot 15 = 1920$ . Отримані нормовані значення  $\rho^*(1,2) = 0,034$ ,  $\rho^*(1,3) = 0,073$ ,  $\rho^*(2,3) = 0,066$  вказують на те, що класифікаційні можливості при цьому не покращуються. Зауважимо, що результат застосування підрахунку голосів КТ відповідно до встановленої процедури залежить від порядку слідування аргументів, тобто не є комутативним (рис. 1). Тому, наприклад, при значенні порогу  $\alpha(s/2) = \alpha(88)$  число КТ першого зображення при порівнянні з центром другого дорівнює 100, а число КТ другого зображення при зіставленні з центром першого – 70. Маємо, що візуально близькі зображення 1 та 2 методом класифікації окремих дескрипторів за встановленим порогом для відстані не класифікуються. У той же час решта пар зображень: 1-3, 2-3 розрізняються досить впевнено, так як кількість класифікованих КТ супротивних зображень для них лежить у межах  $54 \dots 82$ , тобто менше 88. У той же час при використанні описів інших зображень (відстань між центрами із зображенням 1 складає 53) досягається впевнена класифікація.

Проведені дослідження у плані аналізу зниження та збільшення індексу граничного значення для кількості використаних дескрипторів відносно середини  $s/2$ . Конкретно із відсортованої послідовності були вибрані значення  $\alpha(50)$  та  $\alpha(120)$ . Незважаючи на те, що при порозі  $\alpha(50)$  спостерігалось деяке посилення розбіжностей для аналізованих описів, впевнена класифікація близьких зображень 1 та 2 при цьому також не забезпечена, при цьому інші зображення класифікуються.

Обчисленням за виразом (5) визначено величини скалярного добутку між центрами (максимум дорівнює 512):  $\gamma(1,2) = 120$ ,  $\gamma(1,3) = 119$ ,  $\gamma(2,3) = 118$ . У той же час власні скалярні добутки (квадрати норм)

для центрів  $\gamma(1,1)=123$ ,  $\gamma(2,2)=121$ ,  $\gamma(3,3)=129$ , що вказує на практичну відсутність потрібної властивості для функції скалярного добутку у плані розрізнення, так як нормований скалярний добуток  $\gamma^*(1,2)=0,98$ ,  $\gamma^*(1,3)=0,94$ , тобто, значення скалярних добутків досить близькі між собою, що загалом не забезпечує класифікаційні можливості. На наш погляд, одним із факторів, що збільшує значення (5), є бінарний вид аналізованих даних.

Загальний висновок з експерименту полягає в тому, що застосування скалярного добутку замість манхеттенської відстані (4) дещо зменшує класифікаційні можливості граничної класифікації. У процесі моделювання також перевірялися можливості управління значенням порогу, що задає розміри околу для СЦ даних. Одним із варіантів було визначення єдиного порогу для бази класифікованих зображень, який обчислюється шляхом вибору мінімального серед порогів. Експерименти показали зменшення числа неправильно класифікованих КТ, але близькі зображення 1 та 2 при застосуванні такої модифікації не розрізняються. Іншим варіантом оброблення є вибір у якості центру того дескриптора із опису, який є найближчим за відстанню до СЦ. У цьому випадку центр є елементом кластера [13]. Моделювання, як і передбачалось, засвідчило погіршення розрізненості зображень за рахунок «огрубіння» значення СЦ. Число неправильно класифікованих КТ збільшилось, хоча класифікація забезпечена, але близькі зображення також не розрізняються.

### Висновки

Обговорюваний у статті спосіб класифікації зображень на підставі множин дескрипторів КТ

грунтується на значеннях векторів – СЦ еталонних класів у сенсі середніх значень для дескрипторів їх опису. Цей спосіб досягає максимальної ефективності у ситуації, коли центри еталонів, що складають базу для розпізнавання, суттєво різняться. Застосування логічного аналізу спрощує оброблення і сприяє підвищенню швидкодії класифікації.

Найкращі результати щодо класифікації окремих дескрипторів показав підхід з використанням уточнених центрів. Виділення та використання концентрованої частки даних опису дає можливість точніше зосередитися на його властивостях, що відображають відмінності з іншими описами.

Наукову новизну дослідження складає удосконалення методу класифікації зображень на основі впровадження логічного аналізу інтегрованої інформації – статистичного центру опису, що дає можливість модифікувати склад опису зі збереженням властивостей об'єктів в аспекті результативної класифікації.

Практична значущість роботи полягає у досягненні прийнятого рівня результативності класифікації за визначеною моделлю релевантності, підтвердженні працездатності запропонованих модифікацій оброблення даних на прикладах зображень, розробленні програмних моделей для впровадження описаних методів класифікації в системах комп'ютерного зору.

Побудова більш універсального підходу задля забезпечення гарантованої результативності для довільних даних може здійснюватися збільшенням числа центрів, комплект яких буде більш точно реалізувати апроксимацію даних для наявних еталонних описів. Обчислення набору таких центрів може здійснюватися, наприклад, через застосування систем ортогональних функцій або формуванням кластерів на множині аналізованих даних.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Xu Zhang, Felix X. Yu, Svebor Karaman, Shih-Fu Chang (2017). Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors. – The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 6818-6826.
- Masamichi KITAGAWA, Ikuko SHIMIZU (2019). Memory Saving Feature Descriptor Using Scale and Rotation Invariant Patches around the Feature Points. – IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E102.D, Issue 5, pp. 1106-1110.
- Ravimal Bandara, Lochandaka Ranathunga, Nor Aniza Abdullah (2019). Nature Inspired Dimensional Reduction Technique for Fast and Invariant Visual Feature Extraction. – Int. Journal of Adv. Trends in Comp. Sc. & Eng., Vol. 8, No.3, pp. 696-706.
- Sivaram, M., Porkodi, V., Mohammed, A.S., Manikandan V. Detection of Accurate Facial Detection Using Hybrid Deep Convolutional Recurrent Neural Network. *ICTACT Journal on Soft Computing*. 2019. Vol. 09, Issue 02. pp. 1844-1850. DOI: 10.21917/ijsc.2019.0256
- Amin Salih Mohammed, Saravana Balaji B., Hiwa Abdulkarim Mawlood. Conceptual analysis of Iris Recognition Systems. *Advanced Information Systems*. 2019. Vol. 3, No. 2. P. 86-90. DOI : <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.15>
- Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study”, Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
- Худов В.Г. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // Системи обробки інформації, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77-80.
- Yaloveha V., Hlavcheva D., Podorozhniak A. Usage of convolutional neural network for multispectral image processing applied to the problem of detecting fire hazardous forest areas. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, № 1. С. 116–120. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.19>
- Баклицкий, В.К. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации / В.К. Баклицкий, А.М. Бочкарев, М.П. Мусьяков. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.
- Gorokhovatskyi, V., Gadetska, S., Ponomarenko, R. (2019) Recognition of Visual Objects Based on Statistical Distributions for Blocks of Structural Description of Image. Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. – Proc. of the XV Int. Scientific Conf. “Intellectual Systems of Decision Making and Problems of Computational Intelligence” (ISDMCI 2019), Ukraine, May 21–25, 2019, pp. 501-512. – Available online: [https://rd.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-26474-1\\_35](https://rd.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-26474-1_35)
- Gorokhovatskyi, O. Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features / O. Gorok-

- hovatskyi, V. Gorokhovatskyi, O.Peredrii // Data. – 2018, 3(4), 52. – doi: 10.3390/data3040052. Available online: <https://www.mdpi.com/2306-5729/3/4/52>
12. Lyashenko V., Kobylin O., Baranchukov Y. Ideology of Image Processing in Infocommunication Systems // 2018 Int. Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2018. – P. 47-50.
  13. Миркин, Б. Г. Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений: обзор. Препринт WP7/2011/03 / Б. Г. Миркин. – М.: Изд. дом НИУ ВШЭ, 2011. – 88 с.
  14. Гороховатський В.О. Статистичні розподіли та ланцюжкове подання даних при визначенні релевантності структурних описів візуальних об'єктів / В.О. Гороховатський, С.В. Гадецька, Р.П. Пономаренко // Системи управління, навігації та зв'язку. –2018. – №6 (52). – С. 87–92.
  15. Гороховатський В.О. Вивчення статистичних властивостей моделі блочного подання для множини дескрипторів ключових точок зображень / В.О. Гороховатський, С.В. Гадецька, Н.І. Стяглик // Радіоелектроніка, інформатика, управління. –2019. – №2. – С. 100–107.
  16. Leutenegger, S., Chli, M., Siegwart, R. Y. (2011) BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. – Computer Vision (ICCV), pp. 2548 – 2555.
  17. OpenCV Open Source Computer Vision. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.opencv.org/master/index.html>

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Є. П. Путятін,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків  
Received (Надійшла) 10.07.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

### Логический анализ и обработка данных для классификации изображений на основе формирования статистического центра описания

В. А. Гороховатский, С. В. Гадецька, Р. П. Пономаренко

**Предметом** исследования являются модели для классификации изображений в пространстве описаний как множества дескрипторов ключевых точек при распознавании визуальных объектов в системах компьютерного зрения. **Целью** есть развитие структурного метода классификации путем внедрения логической обработки данных с использованием вероятностного распределения в виде статистического центра. **Задачи:** разработка математических и программных моделей для вычисления релевантности описаний изображений с использованием логического анализа, изучение свойств, вариантов применения, значений параметров моделей, оценивание результативности по результатам обработки экспериментальной базы изображений. Применяемые **методы:** детектор BRISK для формирования дескрипторов ключевых точек, интеллектуальный анализ данных, математическая статистика, способы определения релевантности для множеств данных, программное моделирование. Полученные **результаты:** эффективность способа классификации на основе логического анализа с использованием статистических центров зависит от расстояний между центрами эталонов базы. Применение логического анализа упрощает обработку и повышает быстродействие классификации. Наилучшие результаты классификации отдельных дескрипторов показал подход с использованием уточненных центров. Использование концентрированной части данных описания дает возможность более тщательно сосредоточиться на его отличиях от других описаний. **Выводы. Научная новизна** – усовершенствование метода классификации изображений на основе применения логического анализа с помощью статистического центра описания, что дает возможность модифицировать состав описания с сохранением свойств объектов в аспекте результативной классификации. **Практическая значимость** работы состоит в достижении приемлемого уровня эффективности классификации относительно определенной модели релевантности, подтверждении работоспособности предложенных модификаций обработки данных на примерах изображений, разработке программных моделей для применения описанных методов классификации в системах компьютерного зрения.

**Ключевые слова:** структурные методы классификации изображений, ключевая точка, детектор BRISK, дескриптор, статистический центр, концентрированное описание, логический анализ, релевантность описаний, результативность классификации, агрегированный образ.

### Logical analysis and processing of data for the classification of images on the basis of formation of statistical center description

V. Gorokhovatskyi, S. Gadetska, R. Ponomarenko

**The subjects** of research are the models for classifying images in the description space as multiple key point descriptors when recognizing visual objects in computer vision systems. **The goal** is to develop a structural method of classification by introducing logical data processing using probability distribution in the form of statistical center. **The tasks** include the development of mathematical and software models to calculate the relevance of image descriptions using logical analysis, study of properties, variations of application, values of model parameters, evaluation of the results of processing the experimental image database. **The methods** are used: a BRISK detector for forming the key point descriptors, data mining, mathematical statistics, means of determining relevance for data sets, software modeling. The following **results** were obtained. The effectiveness of a method of classification based on logical analysis using statistical centers that depend on the distances between centers of etalons. Logical analysis simplifies processing and increases classification speed. The best results on the classification of individual descriptors were shown by the use of refined centers. Using a concentrated portion of the description data allows you to focus more closely on its differences with other descriptions. **Conclusions.** The contribution of the paper is the improvement of the image classification based on the implementation of logical analysis of the statistical center description, which allows modifying the composition of the description while maintaining the properties of objects in terms of effective classification. **The practical significance** of the paper is the achievement of the accepted relevance level according to a defined model of relevance, to validate the proposed modifications to the processing of sample images, to develop software models for implementing the described methods of classification in computer vision.

**Keywords:** structural image recognition methods, key point, BRISK detector, descriptor, statistical center, concentrated description, logical analysis, relevance of descriptions, the effectiveness of classification, aggregated image.



Ю. О. Данілов<sup>1</sup>, В. В. Стадник<sup>2</sup><sup>1</sup> Центральне управління технічного забезпечення Повітряних Сил Збройних Сил України, Київ<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ШТУЧНОГО ЗСУВУ ПОВІТРЯНИХ МАС В АТМОСФЕРІ

Штучний зсув повітряних мас (ШЗПМ), спричинений вивільненням великої кількості енергії в повітряному просторі, є аналогом природного зсуву вітру, але може бути набагато потужнішим. Штучний зсув повітряних мас розглядається як зсув вітру синусоїдального типу, описаного відповідною системою диференціальних рівнянь зміни газодинамічних характеристик навколишнього середовища при потужних вибухах. Він може мати значний вплив на стійкість та керованість, зміну маневрових можливостей і траєкторії літального апарату. **Мета статті** – провести аналіз проведених досліджень формування ШЗПМ та моделювання цього явища в атмосфері з отриманням результатів зміни основних характеристик. Запропонована математична модель цього явища для дослідження впливу його на динаміку руху літального апарату дозволила провести чисельний експеримент. Це в подальшому дасть змогу відпрацювати рекомендації по зменшенню впливу штучного зсуву повітряних мас та запобіганню попаданню в зони його рушійної дії. Можливе застосування цього явища для зменшення ефективності дій авіації противника.

**Ключові слова:** штучний зсув повітряних мас, ударна хвиля, динаміка руху, літальний апарат, диференціальне рівняння.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На нинішньому етапі розвитку технологій потужні вибухи у повітрі найбільш доступні за рахунок ядерної енергії, їх можна також здійснювати з допомогою звичайної вибухової речовини, але для цього необхідна маса, еквівалентна тисячам тон, і що технічно досягти не завжди можливо та і недоцільно. У військових цілях у протиракетній та протиповітряній обороні ядерну зброю планується використовувати проти важливих повітряних і космічних цілей. Стосовно повітряних цілей, то розглядається сім факторів їх поразки. Усі вони мають тільки їм властиву фізичну природу вражаючої дії, зв'язану з руйнуванням об'єкту і його елементів.

До факторів поразки повітряних цілей можна віднести і зсув повітряних мас, що проявляється при потужних вибухах. Фізична природа його вражаючої дії суттєво відрізняється від дії на літальні апарати (ЛА) уже відомих факторів, тому даний зсув можна рахувати як окремий фактор, аспекти якого вимагають детального розгляду і досліджень.

Звідси виникають питання: чи можливо цей феномен застосувати як зброю, що уражає повітряну ціль на аеродинамічних принципах? Чи можливо формувати такі зсуви повітряних мас зарядами меншої потужності, але направленої дії?

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх досліджень та публікацій з даної тематики свідчить, що ШЗПМ може мати значний вплив на стійкість та керованість та зміну маневрових можливостей і траєкторії літального апарату. На сучасному етапі досліджень в даному напрямку було виділено ШЗПМ з ударної хвилі (УХ) і обґрунтоване це явище [1, 2]. Також проводилися дослідження складної картини нестационарного обтікання профілю крила з дифракцією ударної хвилі, з утворенням відривів потоку та інтенсивних вихорів, що ускладнюють розрахунки і аналіз сил і моментів, які діють на тіло. Як показано в роботах [3-5], ці неста-

ціонарні сили можуть суттєво відрізнятися від сил, розрахованих по квазістационарній теорії, та враховано ступінь нестационарності обтікання крила для конкретного типу ЛА з розрахунком часу його знаходження в ШЗПМ [2].

**Мета статті** – провести аналіз проведених досліджень формування ШЗПМ та моделювання цього явища в атмосфері з отриманням результатів зміни основних характеристик.

### Виклад основного матеріалу

ШЗПМ – це відносна зміна швидкості руху повітряних мас за величиною та напрямком у визначеному об'ємі чи прошарку атмосфери викликана внесенням великої кількості енергії в атмосферу [1]. ШЗПМ формується як складова ударної хвилі. Швидкість руху ШЗПМ  $U$  залежить від потужності  $q$  та висоти вибуху  $H$  в умовах безмежної атмосфери.

У самому спрощеному вигляді модель ШЗПМ нагадуватиме модель зсуву вітру. Його природа добре вивчена у світовій практиці, реалізована на моделях і не вимагає додаткових доказів щодо наслідків [6-10]. Процедура розрахунку параметрів УХ і ШЗПМ за нею при потужних вибухах являє собою лінеаризовану систему диференціальних рівнянь. Вона описує параметри руху ударної хвилі і ШЗПМ і відповідні їх параметри у точці зустрічі з ЛА та при їх сумісному русі.

Підсистема математичної моделі ШЗПМ тісно пов'язана з підсистемою навколишнє середовище, адже параметри ШЗПМ залежать від стану атмосфери та її основних характеристик [11, 12].

Отже, ми маємо модель ШЗПМ (1-9), яку приводимо у кінцевому вигляді для плоскої УХ (сферичністю ударної хвилі на великих відстанях відносно малих розмірів ЛА можна знехтувати) [1, 5, 11-23]:

$$\tau_+ = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{R} \cdot \sqrt[3]{q}; \quad (1)$$

$$\tau_- = 0,1 \cdot \sqrt[3]{q}; \quad (2)$$

$$\rho_\phi = \rho_H \cdot \frac{(k+1) \cdot \Delta P_\phi + 2 \cdot k \cdot P_H}{(k-1) \cdot \Delta P_\phi + 2 \cdot k \cdot P_H}; \quad (3)$$

$$T_\phi = T_0 \cdot \frac{P_\phi \cdot \rho_0}{\rho_\phi \cdot P_0}; \quad (4)$$

$$\Delta P_\phi = 8.8 \cdot \frac{\sqrt[3]{q}}{r} + 240 \cdot \frac{\sqrt[3]{q^2}}{r^2} + 6000 \cdot \frac{q}{r^3}; \quad (5)$$

$$\Delta P = f \left( \Delta P_\phi, t_\phi \cdot \frac{D_\phi}{D_\phi - V_{xg} \cdot \cos \Theta_w} \right); \quad (6)$$

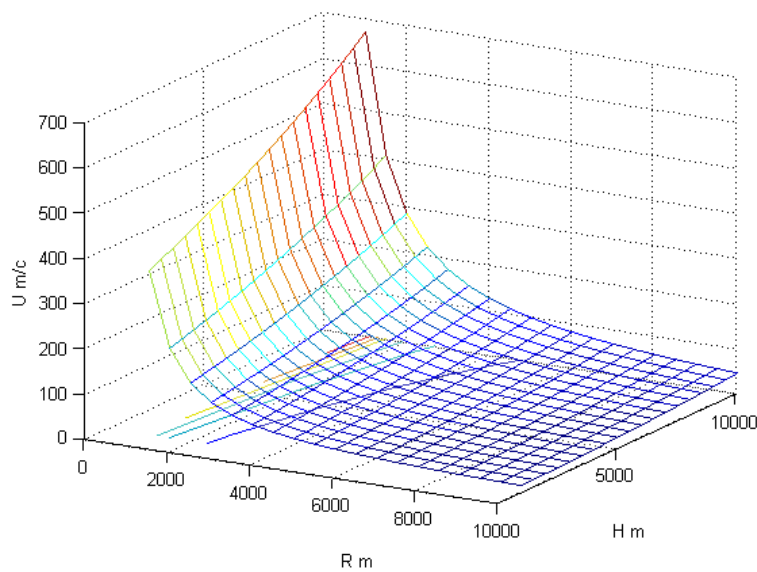
$$D_\phi = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot \rho_\phi}{(\rho_\phi - \rho_H) \cdot \rho_H}}; \quad (7)$$

$$U = \sqrt{\Delta P \cdot (\rho_\phi - \rho_H) / (\rho_H \cdot \rho_\phi)}; \quad (8)$$

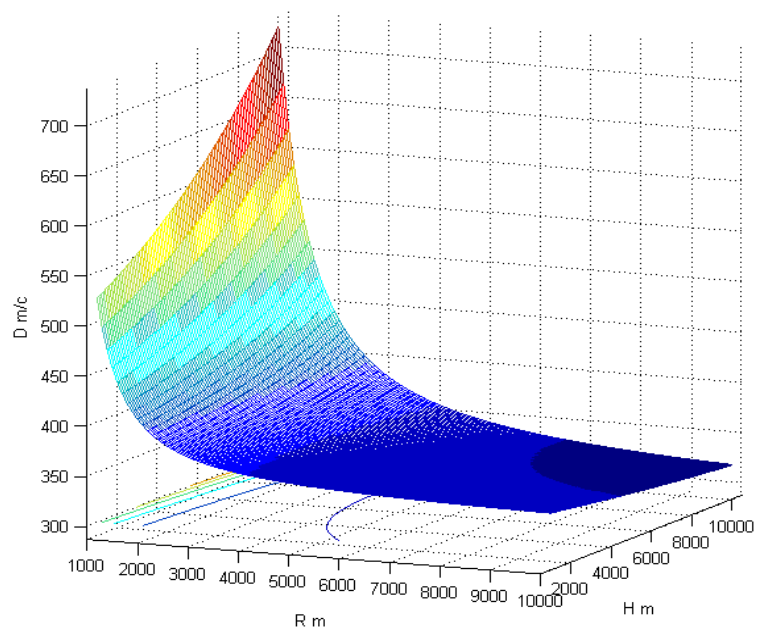
$$\frac{P_\phi}{P_H} = \frac{(k+1) \cdot \rho_\phi - (k-1) \cdot \rho_H}{(k+1) \cdot \rho_H - (k-1) \cdot \rho_\phi}. \quad (9)$$

Використовуючи рівняння (1-9) математичної моделі штучного зсуву повітряних мас та рівняння математичної моделі стандартної атмосфери, отримуємо графічну залежність параметрів штучного зсуву повітряних мас від висоти розповсюдження ударної хвилі  $H$ , потужності вибуху та відстані від епіцентру вибуху  $R$  (рис. 2, 3).

Із отриманих графічних залежностей полягає:  
 – зі збільшенням висоти при одній і тій самій відстані від центра вибуху швидкість руху повітряних мас за УХ зростає;



**Рис. 2.** Залежність зміни швидкості повітряних мас за УХ від відстані до центра вибуху та висоти розповсюдження УХ



**Рис. 3.** Залежність швидкості проходження фронту УХ від висоти  $H$  та відстані від центра вибуху  $R$

– швидкість розповсюдження ударної хвилі на різних відстанях від центру вибуху змінюється по різному. На близькому віддаленні від центру вибуху, де УХ ще має велику кінетичну та потенційну енергію, швидкість розповсюдження з висотою збільшується, але на великих відстанях вона зменшується значно більше;

– градієнти зміни швидкості руху повітряних мас по висоті мають різний характер в залежності від потужності ударної хвилі. Тобто при  $R=1000$  м,  $\Delta P=2,53$  кгс/м<sup>2</sup> швидкість ШЗПМ з висотою буде змінюватись від 350 до 600 м/с, а при  $R=3000$  м від 58 до 90 м/с;

– час дії фази стискання також зі збільшенням висоти збільшується.

Вивчення формування і поширення ударних хвиль у реальному газі дає багатий матеріал для побудови теорії хвильових процесів у хімічно реагуючому середовищі [5]. Розгляд таких процесів методом розривів дозволяє дати єдиний опис фронтним явищам різного характеру.

При повітряному потужному вибуху тиск у фронті УХ в приземному шарі повітря і її вражаюча дія залежать не тільки від потужності, висоти вибуху і відстані від епіцентру, але й від стану поверхні землі в районі вибуху [1].

Процес дії УХ на ЛА значно складніший від дії зсуву вітру і вже не може розглядатись як квазістационарний. Це викликано тим, що він зв'язаний не лише зі швидкостями руху, але і з тиском та щільністю повітряних мас. Крім того, газодинамічні зміни на фронті УХ та наступному за нею ШЗПМ, на відміну від зсуву вітру, більш швидкоплинні, особливо у порівнянні з власними динамічними властивостями літальних апаратів. Крім всебічного обтискання і тиску відбиття ударної хвилі, починається зміна

аеродинамічних сил та моментів ЛА. Це обумовлюється потоком ШЗПМ за фронтом ударної хвилі, швидкість якого векторно складається зі швидкістю обтікаючого на ЛА потоку, яку він мав до дії ударної хвилі.

Сумарна швидкість потоку відрізняється від початкової як за величиною, так і за напрямком. Як наслідок, при цьому різко міняється швидкісний напір, кути атаки, ковзання, тангажу, крену і ривка літального апарату.

Значна зміна кутів атаки і ковзання приводить до необхідності забезпечити безпеку польоту за стійкістю і керованістю ЛА. Це пояснюється тим, що у процесі непостійності руху при дії ШЗПМ ЛА може вийти на закритичні режими з наступним звалюванням та входом у штопор і т. п. В іншому випадку можуть бути перевищені обмеження за перевантаженням, установлені для конкретного типу ЛА. Штучний зсув повітряних мас може мати значний вплив на стійкість та керованість та зміну маневрових можливостей і траєкторії літального апарату.

### Висновки

Отже штучний зсув повітряних мас (аналог зсуву вітру) є небезпечне явище, яке необхідно досконально досліджувати, але проведення досліджень в натуральних умовах неможливе із-за великих витрат. Запропонована математична модель цього явища для дослідження впливу його на динаміку руху літального апарату дозволила провести чисельний експеримент. Це в подальшому дасть змогу відпрацювати рекомендації по зменшенню впливу штучного зсуву повітряних мас та запобіганню попадання в зони його рушійної дії.

Також можливе застосування цього явища для зменшення ефективності дій авіації противника.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Корочкін О.А. Ураження аеродинамічних літальних апаратів за рахунок зсуву повітряних мас при потужних вибухах / Корочкін О.А., Литвинчук М.І., Костаков А.Г. // Збірник наукових праць Харківського військового університету. – Випуск №3(41)–2002. – с.151–153.
2. Колодяжний О.І. Моделювання небезпечних зон впливу штучного зсуву повітряних мас на динаміку руху високоманевреного літака. / О.І. Колодяжний, О.І. Тимочко. // Системи обробки інформації, – 2017. Вип. 1(147). – С. 80-87.
3. Иванов А. Н. Исследование обтекания конических тел нестационарным потоком газа за сферической ударной волной. / А. Н. Иванов // – Труды ЦАГИ, 1983. – Вып. 2184 – С. 3-26.
4. Иванов А. Н. О действии нестационарного потока газа на плоскую пластину. / А. Н. Иванов // Труды ЦАГИ, 1983. — Вып 2184 — С. 27–33.
5. Ляхов В.Н. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкций. / В.Н. Ляхов // М.: Машиностроение. 1989. – 392 с.
6. Ранцан Я.Я. Динамическая реакция самолёта при воздействии двумерного поля скорости вертикального порыва ветра. / Я. Я. Ранцан // Научно-методические материалы по аэроупругости летательных аппаратов. – 1983. Вып. 1302. – С. 108-115.
7. Трунов О. К. Влияние сдвига ветра на взлет и посадку самолетов. / О. К. Трунов, Л. И. Журавлев. — М.: ГосНИИ ГА, 1979. — 148 с.
8. Обрубов А. Г. Динамика самолёта в условиях сдвига ветра. / А. Г. Обрубов, В. Е. Грязин // Труды ЦАГИ. — 1983. — Вып. 2163. — С. 3–24.
9. K. R. Goff. Wind and wind shear Tech Center FAR. / K. R. Goff. Wist Poc 2 ICAO Monterial, 1981. — 284 с.
10. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах Doc9817 AN/449, ICAO, 2005. — 258 с.
11. Макеев В.И. Математическая модель динамики полёта летательных аппаратов в возмущённой среде. / В.И. Макеев, Н.Н. Ляпа, С.П. Латин, П.Е. Трофименко // – Электронное моделирование, – 2011. Т.33 №6. – С. 19-32.
12. Лойцянский Л.Г.. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский // Издание 7-е, исправленное. – М.: ДРОФА, 2003.–840 с.
13. Руководство по стандартной атмосфере ИКАО с верхней границей, поднятой до 80 километров (262 500 футов). Doc.7488/3. — Третье изд. — ICAO, 1993. — 305 с.

14. Селиванов В. В. Взрывные технологии / В. В. Селиванов, И. Ф. Кобылкин, С. А. Новиков. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 519 с.
15. Зельдович Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. — М.: Наука, 1966. — 686 с.
16. Механическое действие ядерного взрыва / [Архипов В. Н., Борисов В. А., Будков А. М. и др.]. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 384 с. — ISBN 5-9221-0261-3.
17. Фатеев В. Н. Физическое и математическое моделирование усиления ударных волн: дис. на соискание ученой степени канд. физ.-матем. наук. Спец. 01.02.05 / Фатеев Владимир Николаевич. — Т., 2011. — 110 с.
18. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Издание девятое, переработанное. / Л. И. Седов. — [Изд. 9, перераб.]. — М.: Наука, 1981. — 448 с.
19. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. Studies in Systems, Decision and Control, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
20. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), "Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study", Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
21. Barkovska O., Serdechnyi V. Control model of data stream transmitted over a network based on proxying technology // Informatics Control Measurement in Economy and Environment Protection. — 2018. — Vol. 8, No. 1. — P. 8-11.
22. Barkovska O. Yu., Kazmina D. R., Rosinskyi D. M., Slabouz V. V., Intellectualization of the smart house system (the agent-oriented approach) // Збірник наукових праць ФМФ ДДПУ. - Слов'янськ, 2019. — Вип. 9. - С. 69-74.
23. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. / Л. Прандтль. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1951. — 576 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О. І. Тимочко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Received (Надійшла) 19.04.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.06.2019

### **Моделирование процесса функционирования искусственного сдвига воздушных масс в атмосфере**

Ю. А. Данилов, В. В. Стадник

Искусственный сдвиг воздушных масс, вызванный высвобождением большого количества энергии в воздушном пространстве, является аналогом природного сдвига ветра, но может быть гораздо мощнее. Искусственный сдвиг воздушных масс рассматривается как сдвиг ветра синусоидального типа, описанного соответствующей системой дифференциальных уравнений изменения газодинамических характеристик окружающей среды при мощных взрывах. Он может иметь значительное влияние на устойчивость, управляемость, изменение маневровых возможностей и траектории летательного аппарата. Цель статьи - провести анализ проведенных исследований формирования искусственного сдвига воздушных масс и моделирования этого явления в атмосфере с получением результатов изменения основных характеристик. Предложенная математическая модель этого явления для исследования влияния его на динамику движения летательного аппарата позволила провести численный эксперимент. Это в дальнейшем позволит отработать рекомендации по уменьшению влияния искусственного смещения воздушных масс и предотвращению попадания в зоны его движущей действия. Также возможно применение этого явления для уменьшения эффективности действий авиации противника.

**Ключевые слова:** искусственный сдвиг воздушных масс, ударная волна, динамика движения, летательный аппарат, дифференциальные уравнения.

### **Modeling the process of functioning of artificial movement of air masses in the atmosphere**

Yu. Danilov, V. Stadnik

The artificial shear of air masses caused by the release of a large amount of energy in the airspace is an analogue of the natural shear of the wind, but can be much more powerful. An artificial shift in air masses is considered as a displacement of a sinusoidal wind described by the corresponding system of differential equations for changing the gas-dynamic characteristics of the environment during powerful explosions. The purpose of the article is to analyze the studies of the formation of an artificial shear of air masses and simulate this phenomenon in the atmosphere with the results of changes in the main characteristics. The simulation results are obtained, based on which conclusions are made: with increasing height at the same distance from the center of the explosion, the speed of movement of air masses behind the shock wave increases; the speed of propagation of a shock wave at different distances from the center of the explosion varies differently. At a short distance from the center of the explosion, where the shock wave still has a large kinetic and potential energy, the propagation velocity increases with height, but it decreases much more at large distances; gradients of changes in the speed of movement of air masses in height are of a different nature depending on the power of the shock wave. That is, at  $R=1000$  m,  $\Delta P=2.53$  kgf/m<sup>2</sup>, the speed of artificial shear of air masses with height will vary from 350 m/s to 600 m/s, and at  $R=3000$  m from 58 m/s to 90 m/s; the duration of the compression phase also increases with increasing height. The artificial shift of air masses is a dangerous phenomenon that needs to be thoroughly investigated, but conducting research in natural conditions is impossible due to the high cost. Therefore, it is necessary to develop a mathematical model of this phenomenon to study its effect on the dynamics of the aircraft and conduct a numerical experiment. That in the future will make it possible to work out recommendations for reducing the effect of artificial displacement of air masses and preventing them from falling into zones of its destructive effect.

**Keywords:** artificial air mass shift, shock wave, motion dynamics, aircraft, differential equations.

Н. Г. Кучук

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## МЕТОД РОЗРАХУНКУ МАКСИМАЛЬНИХ ІНТЕНСИВНОСТЕЙ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У ГІПЕРКОНВЕРГЕНТНІЙ СИСТЕМІ

У статті розглянуто метод розрахунку максимальних інтенсивностей інформаційних потоків у гіперконвергентній системі. **Мета статті** – розробка методу розрахунку максимальних інтенсивностей інформаційних потоків при централізованому управлінні, котрий повинен враховувати особливості централізованого управління і відсутність гетерогенності програмних і апаратних засобів. **Результати дослідження.** Проведений попередній аналіз причин затримки пакетів в гіперконвергентній системі показав, що для її розрахунку достатньо мати значення таких параметрів: інтенсивність інформаційних потоків; довжина маршрутів; час комутації пакета; пропускна здатність каналів зв'язку; довжина пакета. Розроблений метод базується на двохетапному підході до вирішення завдання. На першому кроці здійснюється обчислення прогнозованої середньої затримки пакета. На другому кроці виконується обчислення значень інтенсивностей потоків даних, що циркулюють в системі, та запускається процес ітеративного розподілу для отримання значень максимально можливих інтенсивностей інформаційних потоків. Слід зазначити, що запропонований метод орієнтований на централізоване управління наявними ресурсами. **Висновок.** Запропонований метод орієнтований на централізоване управління наявними ресурсами та дозволяє підвищити ефективність експлуатації гіперконвергентних систем.

**Ключові слова:** гіперконвергентна система, пропускна здатність, інформаційний потік.

### Вступ

**Аналіз проблеми та наукових публікацій.** Управління обчислювальними потужностями, сховищами, серверами, локальними мережами через загальну консоль адміністрування, що передбачає наявність гіперконвергентної інфраструктури, має як позитивні так і негативні сторони [1, 2]. Найбільш переважним фактором при цьому є суттєве зменшення витрат як на обслуговування системи, так і на її модифікацію [3, 4]. Але при цьому внаслідок централізації управління зменшуються показники продуктивності та надійності системи [5, 6]. Тому в гіперконвергентних системах оптимальний розподіл інформаційних потоків відіграє істотну роль [7, 8]. У свою чергу, для розподілу інформаційних потоків необхідно прогнозувати їх інтенсивності та розраховувати максимально можливі значення, виходячи із параметрів системи.

Методи розрахунку максимальних інтенсивностей інформаційних потоків при централізованому управлінні розглядаються в багатьох наукових роботах [9 – 12]. Однак в більшості робіт не враховуються особливості функціонування гіперконвергентних систем. Тому **метою даної статті** є розробка методу розрахунку максимальних інтенсивностей інформаційних потоків при централізованому управлінні, котрий повинен враховувати особливості централізованого управління і відсутність гетерогенності програмних і апаратних засобів.

### Результати досліджень

1. Проведемо аналіз причин затримки пакетів в гіперконвергентній системі. Затримка пакета даних на каналі зв'язку (КЗ) складається з чотирьох компонент [13]: затримка пакета даних на обробку (комутацію); затримка пакета даних в черзі; затримка передачі пакета даних; затримка поширення пакета даних. При такому розгляді не враховується повторна передача пакета даних за КЗ через помилки при

передачі або будь-яких інших причин. Також припустимо, що затримка обробки пакета не залежить від потоку інформації, тоді вона є такою [6]:

$$T_z = T_{comm} + T_{wait} + T_{transfer},$$

де  $T_c$  – сумарний час комутації пакета;  $T_{wait}$  – сумарний час очікування пакета у черзі;  $T_{transfer}$  – сумарний час передачі пакета по каналах зв'язку.

Вирази для визначення часу комутації пакета та очікування пакета у чергах мають вигляд [6]:

$$T_{comm} = \sum_{b=1}^{h_w} t_{comm_b}, \quad T_{wait} = \sum_{b=1}^{h_w} t_{wait_b}$$

де  $h_w$  – кількість КЗ, що складають маршрут;  $t_{y_b}$  – час комутації пакета у пристрої, що інцидентний  $b$ -му КЗ;  $t_{o_b}$  – час очікування у черзі до  $b$ -го КЗ.

Час очікування пакета в черзі до КЗ є таким:

$$t_{wait_b} = (\ell_{wait_b} / p_{z_b}) \cdot \ell_p, \quad (4)$$

де  $\ell_{wait_b}$  – довжина черги пакетів до  $b$ -го КЗ;  $\ell_p$  – розмір пакета, переданого по маршруту;  $p_{z_b}$  – пропускна здатність  $b$ -го КЗ з урахуванням його завантаження. Сумарний час передачі пакету по каналах зв'язку розраховується як [6]:

$$T_{transfer} = \sum_{b=1}^{h_w} t_{transfer_b},$$

де  $t_{transfer_b} = k_{z_b} \cdot (\ell_p / p_{z_b})$  – час передачі пакета  $b$ -м КЗ;  $k_{z_b}$  – коефіцієнт завантаження  $b$ -го КЗ.

При визначенні середньої затримки пакета даних в мережі передачі даних, крім того, необхідно враховувати [14] довжину маршрутів та інтенсивність інформаційних потоків, тобто середня затримка пакета є такою:

$$T_p = \sum_{j=1}^{h_r} \sum_{a=1}^{h_m} \left( c_{ma}^j \cdot h_{wa}^j \cdot (t_{comm} + k_z \cdot (\ell_p / p_z) + (\ell_{wait} / p_z) \cdot \ell_p) \right) / c_u, \quad (1)$$

де  $c_u$  – сумарна інтенсивність розподілених інформаційних потоків;  $h_r$  – кількість інформаційних потоків між безліччю вузлів мережі;  $h_m$  – кількість маршрутів для передачі  $j$ -го потоку в розподілі  $\gamma$ ;  $c_{ma}^j$  – інтенсивність  $j$ -го потоку за маршрутом  $m_a^j$ ;  $h_{wa}^j$  – довжина маршруту  $m_a^j$ , що визначається кількістю каналів зв'язку, що входять до маршруту;  $t_{comm}$  – середній час комутації пакета;  $k_z$  – середній коефіцієнт завантаження КЗ;  $\ell_{wait}$  – середня довжина черги до КЗ;  $\ell_p$  – середній розмір пакетів, переданих в мережі;  $p_z$  – середня пропускна здатність КЗ з урахуванням їх завантаження.

Середній коефіцієнт завантаження каналів зв'язку визначається виразом [6]:

$$k_z = k_u + k_c, \quad (2)$$

де  $k_u, k_c$  – середні коефіцієнти завантаження КЗ, створеної розподіленими інформаційними та службовими потоками відповідно; сумарна інтенсивність розподілених інформаційних потоків [6]:

$$c_u = \sum_{j=1}^{h_r} \sum_{a=1}^{h_m} c_{ma}^j, \quad (3)$$

затримка пакета даних на маршруті є такою [6]:

$$T_m = \sum_{b=1}^{h_{wa}^j} t_{comm_b} + k_{z_b} \cdot \frac{\ell_p}{p_{z_b}} + \frac{\ell_{wait_b}}{p_{z_b}} \cdot \ell_p, \quad (4)$$

а пропускна спроможність  $p_{w_b}$  КЗ  $p_{z_b}$  при заданому коефіцієнті завантаження  $k_{z_b}$  [1] дорівнює

$$p_{z_b} = k_{z_b} \cdot p_{w_b}, \quad (5)$$

Отже, величина затримки пакета на маршруті залежить від таких параметрів: кількості каналів зв'язку, що входять до маршруту; часу комутації пакета; пропускної здатності каналів зв'язку; розміру пакета, переданого по маршруту; довжини черги, яка за формулою Полачека-Хінчина є такою [15]:

$$\ell_{wait_b} = k_{z_b}^2 / (2 - 2 \cdot k_{z_b}). \quad (6)$$

де коефіцієнт завантаження можна розрахувати як

$$k_{z_b} = c_{w_b} / p_{w_b}, \quad (7)$$

а сумарна інтенсивність переданих інформаційних потоків за  $b$ -м КЗ  $w_b$  має вигляд [16]:

$$c_{w_b} = \sum_{j=1}^{h_r} \sum_{a=1}^{h_m} c_{ma}^j \cdot k_a^j, k_a^j = \begin{cases} 0, & \text{else } w_b \notin m_a^j; \\ 1, & \text{else } w_b \in m_a^j, \end{cases} \quad (8)$$

Отже, довжина черги пакетів до каналу зв'язку і його коефіцієнт завантаження залежать від таких параметрів: інтенсивність інформаційних потоків; пропускна здатність каналу зв'язку, а коефіцієнт завантаження каналу зв'язку визначається величи-

ною сумарної інтенсивності інформаційних потоків, тобто для розрахунку затримки пакета достатньо мати значення таких параметрів: інтенсивність інформаційних потоків; довжина маршрутів; час комутації пакета; пропускна здатність каналів зв'язку; довжина пакета.

2. Для виконання розподілу інформаційних потоків необхідно провести попередній розрахунок значень інтенсивностей потоків даних, що циркулюють в ній. Дані на передачу від вузлів мережі надходять у випадкові моменти часу  $t$ . Сукупність вузлів мережі породжує стохастический потік даних інтенсивністю  $u$ . Мережу передачі даних можна уявити як складну багатофазну систему масового обслуговування. На обмежених інтервалах часу  $t_0$  можна припустити стаціонарність потоку даних. Припустимо, що потік даних також має властивості ординарності і відсутності післядії. Імовірність того, що за час  $t_0$  буде отримано  $h$  пакетів даних при інтенсивності потоку даних  $u$ , дорівнює

$$P_h(t_0) = \frac{(u \cdot t_0)^h}{h!} \cdot e^{-u \cdot t_0}.$$

Математичне сподівання і дисперсія кількості пакетів, що надійшли в мережу за цей час, дорівнює

$$m = D_x = u \cdot t_0,$$

тобто кількість пакетів даних, що надходять в одиницю часу, може коливатися в досить широких межах. Розрахуємо  $u_{a,i}$  – інтенсивність потоку даних з вузла  $u_a$  до вузла  $y_i$ . Для цього мережу задамо за допомогою неорієнтованого зваженого графа

$$S = (Y, \varphi_y, W, \ell_w, p_w), \quad (9)$$

де  $Y$  – множина вершин графа  $S$ , що знаходяться в у ізоморфізмі з вузлами мережі;  $h_y = |Y|$  – кількість вершин графа  $S$ ;  $\varphi_y: Y \rightarrow N_+$  – вагова функція, що визначає для кожного вузла  $y_i$  його продуктивність  $\varphi_{y_i} = \varphi_y(y_i)$ ;  $W = Y \times Y$  – множина ребер графа  $S$ ;  $\ell_w: W \rightarrow N_+$  – вагова функція, що визначає для кожного КЗ  $w_{a,i}$  його довжину,  $\ell_{w_{a,i}} = \ell_w(w_{a,i})$ ;  $p_w: W \rightarrow N_+$  – вагова функція, що визначає для кожного КЗ  $w_{a,i}$  його пропускну спроможність,  $p_{w_{a,i}} = p_w(w_{a,i})$ .

Для множини вершин  $Y$  побудуємо багаторівневий граф  $B$  і сформуємо матрицю

$$H_B = \| \| h_{B_{a,i}} \| \|, \quad (19)$$

де  $h_{B_{a,i}}$  – кількість рівнів ієрархії мережі, кріз які необхідно пройти пакету даних із  $u_a$  до  $y_i$ .

За допомогою алгоритму Данцига [17] визначимо найкоротші шляхи між кожними двома вер-

шинами  $y_a$  і  $y_i$  графа  $S$ . Сформуємо матрицю

$$L_m = \left\| \ell_{m_{a,i}} \right\|, \quad (20)$$

де  $\ell_{m_{a,i}}$  – довжина найкоротшого шляху між вершинами  $y_a$  і  $y_i$ . Пропускна спроможність шляху між вершинами  $y_a$  і  $y_i$  є такою:

$$p_{m_{a,i}} = \min_{w_j \in m_{a,i}} p_{w_j}, \quad (21)$$

де  $p_{w_j}$  – пропускна спроможність ребра  $w_j$  графа  $S$  зі шляху  $m_{a,i}$ . Якщо  $u_a$  – максимальне значення сумарної інтенсивності потоків даних вершини  $y_a$ , якими вона обмінюється із всіма вершинами множини  $Y$ , а  $u_{a,i}$  – максимальне значення інтенсивності між вершинами  $y_a$  і  $y_i$ , то [18]:

$$u_a = \frac{\ell_p \cdot \varphi_{y_a} \cdot p_{m_a} \cdot \sum_{i=1}^{h_y} \ell_{y_i} \cdot \sum_{i=1}^{h_y} h_{B_i}}{h_y \cdot h_o \cdot \sum_{i=1}^{h_y} p_{m_i} \cdot \ell_{y_a} \cdot h_{B_a}}, \quad (22)$$

де  $\ell_p$  – довжина пакета,  $\ell_p = 1 \div 64$  Кб [19];  $p_{m_a}$  та  $\ell_{y_a}$  – середня пропускна спроможність шляху та середня відстань між вершиною  $y_a$  і іншими вершинами множини  $Y$  відповідно,

$$p_{m_a} = \sum_{i=1}^{h_y-1} \frac{p_{m_{a,i}} \cdot \ell_{m_{a,i}} \cdot h_{B_{a,i}}}{\varphi_{y_i}} \bigg/ \sum_{i=1}^{h_y-1} \frac{\ell_{m_{a,i}} \cdot h_{B_{a,i}}}{\varphi_{y_i}}; \quad (23)$$

$$\ell_{y_a} = \sum_{i=1}^{h_y-1} \frac{\ell_{m_{a,i}} \cdot \varphi_{y_i} \cdot p_{m_{a,i}}}{h_{B_{a,i}}} \bigg/ \sum_{i=1}^{h_y-1} \frac{\varphi_{y_i} \cdot p_{m_{a,i}}}{h_{B_{a,i}}}; \quad (24)$$

$h_{B_a}$  – середній радіус графа  $B$  з центром у  $y_a$ ,

$$h_{B_a} = \sum_{i=1}^{h_y-1} \frac{h_{B_{a,i}} \cdot \varphi_{y_i} \cdot p_{m_{a,i}}}{\ell_{m_{a,i}}} \bigg/ \sum_{i=1}^{h_y-1} \frac{\varphi_{y_i} \cdot p_{m_{a,i}}}{\ell_{m_{a,i}}}; \quad (25)$$

$h_o$  – кількість службових операцій процесора при виводі-виводі пакета, зазвичай,  $h_o = 10^6 \div 2 \cdot 10^6$  опер.

Отримане значення  $u_a$  розподіляється між взаємодіючими вершинами, тобто для вершини  $y_i$ :

$$u_{a,i} = \frac{u_a \cdot \varphi_{y_a} \cdot p_{m_{a,i}}}{\ell_{m_{a,i}} \cdot h_{B_{a,i}}} \bigg/ \sum_{j=1}^{h_y-1} \frac{\varphi_{y_j} \cdot p_{m_{a,j}}}{\ell_{m_{a,i}} \cdot h_{B_{a,j}}}. \quad (26)$$

Для кожної пари вершин  $y_a$  і  $y_i$  можна розрахувати значення  $u_{a,i}$  та  $u_{i,a}$ , які у загальному випадку не є рівними, тому розраховується середньарифметичне максимальне значення інтенсивності потоку даних між цими вершинами [18]:

$$\overline{u_{a,i}} = (u_{a,i} + u_{i,a}) / 2.$$

Перерахунок максимальних значень інтенсивностей потоків даних між вузлами мережі здійснюється в разі зміни її структури. Відзначимо, що істотну роль для розрахунку грає  $\ell_p$  – довжина пакета.

## Висновки

Проведений попередній аналіз причин затримки пакетів в гіперконвергентній системі показав, що для її розрахунку достатньо мати значення таких параметрів: інтенсивність інформаційних потоків; довжина маршрутів; час комутації пакета; пропускна здатність каналів зв'язку; довжина пакета. На основі отриманих результатів розроблено метод розрахунку максимальних інтенсивностей інформаційних потоків у гіперконвергентній системі, який базується на двохетапному підході до вирішення завдання. На першому кроці здійснюється обчислення прогнозованої середньої затримки пакета. На другому кроці виконується обчислення значень інтенсивностей потоків даних, що циркулюють в системі, та запускається процес ітеративного розподілу для отримання значень максимально можливих інтенсивностей інформаційних потоків. Слід зазначити, що запропонований метод орієнтований на централізоване управління наявними ресурсами.

**Напрямок подальших досліджень** – розглянути можливість використання варіативного значення довжини пакета при розрахунку максимальних інтенсивностей інформаційних потоків у гіперконвергентній системі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шматков С. І. Модель інформаційної структури гіперконвергентної системи підтримки електронних обчислювальних ресурсів університетської e-learning / С. І. Шматков, Н. Г. Кучук, В. В. Донець // Системи управління, навігації та зв'язку : науковий журнал. – Полтава : ПНТУ, 2018. – Вип. 2 (48). – С. 97-100.
2. Merlac V. Resources Distribution Method of University e-learning on the Hyperconvergent platform / V. Merlac, S. Smatkov, N. Kuchuk, A. Nechausov // Conf. Proc. of 2018 IEEE 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Dependable Systems, Service and Technologies. DESSERT'2018. Kyiv, May 24-27, 2018. – P. 136-140. – URL : <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409114>
3. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 117–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>.
4. Зиков І. С., Кучук Н. Г., Шматков С. І. Синтез архітектури комп'ютерної системи управління транзакціями e-learning. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 3. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>.
5. Kuchuk N. Method for calculating of R-learning traffic peakedness / N. Kuchuk; O. Mozhaiev, M. Mozhaiev; H. Kuchuk // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017. – 2017. – P. 359 – 362. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>.
6. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>

7. Коваленко А. А. Подходы к синтезу технической структуры компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2014. – № 1(38). – С. 116-119.
8. Saravana, Balaji B., Karthikeyan, N.K. and Raj Kumar, R.S., (2018), "Fuzzy service conceptual ontology system for cloud service recommendation", *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 69, pp. 435–446.
9. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава. ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
10. Amin Salih M., Potrus M.Y. A Method for Compensation of TCP Throughput Degrading During Movement Of Mobile Node. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. 2015. Vol. 27, No 6. P. 59–68.
11. Dhivakar B., Saravanan S.V., Sivaram M., Krishnan R.A. Statistical Score Calculation of Information Retrieval Systems using Data Fusion Technique". *Computer Science and Engineering*. 2012. Vol. 2, Issue 5. pp. 43–45.
12. Sivaram, M., Batri, K., Amin Salih, Mohammed and Porkodi V. (2019), "Exploiting the Local Optima in Genetic Algorithm using Tabu Search", *Indian Journal of Science and Technology*, Volume 12, Issue 1.
13. Кучук Г. А. Метод параметрического управления передачей данных для модификации транспортных протоколов беспроводных сетей / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
14. Sivaram, M., Yuvaraj, D., Amin Salih, Mohammed, Porkodi, V. and Manikandan V. (2018), "The Real Problem Through a Selection Making an Algorithm that Minimizes the Computational Complexity", *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 8, iss. 2, 2018, pp. 95-100.
15. Sivaram, M., Porkodi, V., Mohammed, A.S., Manikandan V. Detection of Accurate Facial Detection Using Hybrid Deep Convolutional Recurrent Neural Network. *ICTACT Journal on Soft Computing*. 2019. Vol. 09, Issue 02. pp. 1844-1850.
16. Mohammed, A. S. Optimal Forecast Model for Erbil Traffic Road Data. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. 2017. Vol. 29, No 5. P. 137–145. DOI: <https://doi.org/10.21271/ZJPAS.29.5.15>
17. Amin Salih M., Yuvaraj D., Sivaram M., Porkodi V. Detection And Removal Of Black Hole Attack In Mobile Ad Hoc Networks Using Grp Protocol. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. Vol. 9, No 6. P. 1–6.
18. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
19. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. А. Коваленко,

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Received (Надійшла) 26.06.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.08.2019

### Метод расчета максимальных интенсивностей информационных потоков в гиперконвергентной системе

Н. Г. Кучук

В статье рассмотрен метод расчета максимальных интенсивностей информационных потоков в гиперконвергентной системе. **Цель статьи** - разработка метода расчета максимальных интенсивностей информационных потоков при централизованном управлении, который должен учитывать особенности централизованного управления и отсутствие гетерогенности программных и аппаратных средств. **Результаты исследования.** Проведенный предварительный анализ причин задержки пакетов в гиперконвергентной системе показал, что для ее расчета достаточно иметь значения таких параметров: интенсивность информационных потоков; длина маршрутов; время коммутации пакета; пропускная способность каналов связи; длина пакета. На основе полученных результатов разработан метод расчета максимальных интенсивностей информационных потоков в гиперконвергентной системе, основанный на двухэтапном подходе к решению задачи. На первом этапе осуществляется вычисления прогнозируемой средней задержки пакета. На втором шаге выполняется вычисление значений интенсивностей потоков данных, циркулирующих в системе, и запускается процесс итеративного распределения для получения значений максимально возможных интенсивностей информационных потоков. Следует отметить, что предложенный метод ориентирован на централизованное управление имеющимися ресурсами. **Вывод.** Предложенный метод ориентирован на централизованное управление имеющимися ресурсами и позволяет повысить эффективность эксплуатации гиперконвергентных систем.

**Ключевые слова:** гиперконвергентная система, пропускная способность, информационный поток.

### The method of calculating the maximum intensities of information flows in hyperconvergent system

N. Kuchuk

In article the method of calculation of the maximum intensities of information flows in a hyperconvergent system is considered. The purpose of the article is to develop a method for calculating the maximum intensities of information flows under centralized management. The method should take into account the features of centralized management. As well as the lack of heterogeneity of software and hardware. **Results of a research.** The analysis of the reasons for packet delay in the hyperconverged system is carried out. For its calculation, it is enough to have the values of the following parameters: intensity of information flows; length of routes; packet switching time; bandwidth of communication channels; packet length. Based on the results, a method for calculating the maximum intensities of information flows in a hyperconverged system based on a two-stage approach to solving the problem is developed. The first step is to calculate the predicted average packet delay. In the second step, the calculation of the values of the intensities of the data flows. They circulate in the system and the iterative distribution process starts. It is needed to obtain the values of the maximum possible intensities of information flows. It should be noted that the proposed method is focused on the centralized management of available resources. **Conclusion.** The proposed method is focused on centralized management of available resources. It allows you to increase the efficiency of operation of the hyperconverged system.

**Keywords:** hyperconvergent system, bandwidth, information flow.



Т. М. Лебеденко<sup>1</sup>, М. В. Головешко<sup>2</sup>, А. В. Холодкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет повітряних сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ АКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЧЕРГАМИ НА ІНТЕРФЕЙСАХ МАРШРУТИЗАТОРІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

У роботі представлено результати дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Основу запропонованого методу складають оптимізаційні моделі погодженого розв'язання задач агрегації та розподілу потоків пакетів за сформованими на інтерфейсі маршрутизатора чергами (управління перевантаженням); розподілу пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора між сформованими чергами (розподіл каналного ресурсу); та забезпечення завчасного обмеження інтенсивності потоків пакетів, що надходять на вхід інтерфейсу маршрутизатора (активне управління чергами). Проаналізовано вплив класів потоків та черг, виду критеріїв оптимальності та множника балансування на характер отриманих рішень та ефективність роботи інтерфейсу.

**Ключові слова:** активне управління чергами, управління перевантаженням, розподіл ресурсу, запобігання перевантаження, якість обслуговування.

### Вступ

Як показав проведений аналіз [1–8], підвищити числові значення таких показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS), як середня затримка, джиттер та ймовірність втрат пакетів можливо за рахунок використання механізмів управління чергами пакетів (Queue Management), які організуються на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж (ТКМ). До подібних механізмів відносяться:

- механізми управління перевантаженнями (Congestion Management), які відповідають за створення черг, розподіл пакетів між чергами на основі їх класів, а також планування порядку обслуговування пакетів в цих чергах;

- механізми розподілу ресурсу (Resource Allocation), які відповідають за розподіл пропускної здатності інтерфейсу між сформованими на ньому чергами;

- механізми активного управління чергами (Active Queue Management, AQM), які також іноді іменують механізмами запобігання перевантажень (Congestion Avoidance). Ці механізми відповідають за відстеження завантаженості черг і запобігання їх можливого переповнення на підставі превентивного обмеження інтенсивності потоків пакетів.

Аналіз відомих математичних моделей та методів управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ [9-18] виявив ряд системних принципів, які необхідні для їх ефективного впровадження та реалізації:

- забезпечення диференціації в обслуговуванні потоків пакетів різних класів відповідно до рівня QoS-вимог;

- адаптивність та масштабованість, тобто можливість моделей та методів автоматично змінювати свої характеристики в залежності від зміни характеристик трафіка та інтерфейсу;

- надійність, тобто здатність моделей та методів продовжувати функціонувати у разі можливо-го перевантаження або навіть часткової відмови обладнання;

- підтримка динамічної стратегії управління чергами, тобто здатність моделей та методів знаходити ефективне рішення в масштабі реального часу;

- простота та невисока обчислювальна складність алгоритмічно-програмної та апаратної реалізації на практиці.

Реалізація вищеперерахованих принципів в рамках одного з механізмів Queue Management досі не впроваджено на практиці. Ось чому актуальною представляється науково-прикладна задача розробки математичних моделей та методів, які пов'язані з оптимізацією механізмів управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ за рахунок забезпечення комплексного вирішення задач активного управління чергами, розподілу ресурсів та управління перевантаженням [9-16].

### Основна частина

**Математичні моделі та метод активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж.** Аналіз відомих рішень щодо механізмів Queue Management, представлених в роботах [9-11, 13, 15], продемонстрував, що результати вирішення задач активного управління чергами ніяк не пов'язані з результатами вирішення задач розподілу ресурсу та/або управління перевантаженнями. Отже, сумісне чи розподілене вирішення перерахованих задач буде призводити до одного й того самого результату. В роботах [13, 15], для зниження розміру оптимізаційних задач запропоновано двоетапний метод розрахунків, де перший етап відповідає за вирішення задачі Congestion Management, тоді як другий – за сумісне вирішення задач AQM та Resource Allocation. Тоді, спираючись на отримані в роботах [9-15] результати, нехай на першому етапі розрахунків, на вхід інтерфейсу маршрутизатора надходять  $N$  потоків пакетів з такими відомими характеристиками ( $i = \overline{1, N}$ ):  $a_i$  – величина середньої інтенсивності  $i$ -го потоку пакетів, яка вимірюється в пакетах за секунду ( $1/c$ );  $k_i^f$  – значення класу  $i$ -го потоку пакетів, яке чим вище, тим з вищим рівнем

QoS він повинен обслуговуватися на інтерфейсі маршрутизатора ТКМ;  $c$  – сумарна інтенсивність потоків у черзі (1/c). Нехай значення класу  $k_i^f$  кількісно виражається дійсним числом, що змінюється від 1 до  $K$  і має місце умова  $1 \leq k_i^f \leq K$ , де  $K$  – максимальне значення класу потоків пакетів. Диференціація потоків пакетів з різними значеннями  $k_i^f$  можлива, наприклад, відповідно до таких ознак:

- зміст полів IP-пакета: IP-Precedence або DSCP;
- значення QoS-Group;
- адреса джерела IP-пакета;
- адреса одержувача IP-пакета;
- MAC-адреси джерела та (або) одержувача пакетів;
- стандартний або розширений список доступу до джерел та (або) одержувачів;
- TCP/UDP-порти джерела та (або) одержувача пакетів;
- код довжини пакета.

В рамках задачі Congestion Management пакети всіх  $N$  потоків, які надійшли на обслуговування на вхід інтерфейса маршрутизатора ТКМ, повинні розподілятися між створеними на ньому  $M$  чергами шляхом розрахунку множини змінних першого типу  $x_{i,j}$  ( $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$ ), кожна з яких характеризує частку  $i$ -го потоку пакетів, спрямованого на обслуговування в  $j$ -ту чергу [9,13,15]. Під величиною  $M$  будемо мати на увазі максимальну можливу кількість черг, яку можна організувати на інтерфейсі маршрутизатора згідно до існуючих механізмів управління перевантаження [1-8].

Вважатимемо, що за аналогією з класифікацією потоків пакетів  $k_i^f$  також встановлено класифікацію самих черг –  $k_j^q$  ( $j = \overline{1, M}$ ), де значення класу кожної  $j$ -ї черги відповідає умові  $1 \leq k_j^q \leq K$ . Критерієм направлення диференційованого потоку пакетів в ту чи іншу чергу буде максимальне співпадіння значень класів  $k_i^f$  та  $k_j^q$  [13]. Агрегація потоків пакетів за відповідними чергами буде актуальною лише у разі виконання умови  $N > M$ , тобто, коли кількість підтримуваних на інтерфейсі маршрутизатора черг є меншою за кількість потоків пакетів, що надійшли на його вхід.

Задля забезпечення виконання умов щодо диференціації обслуговування потоків пакетів з різними QoS-вимогами, запропоновано здійснювати обробку потоків пакетів з близькими значеннями класів  $k_i^f$  в рамках однієї з сформованих на інтерфейсі маршрутизатора черг, а керуючі змінні першого типу  $x_{i,j}$  визначити як булеві:

$$x_{i,j} = \{0,1\}. \quad (1)$$

Тоді, в рамках першого етапу розрахунків, множини керуючих змінних  $x_{i,j}$  визначимо у ході

розв'язання оптимізаційної задачі управління перевантаженнями:

$$\min_x F, \quad (2)$$

де цільова функція  $F$  представлена формою вигляду:

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M h_{i,j}^x x_{i,j}, \quad (3)$$

$h_{i,j}^x$  – метрика обслуговування пакетів  $i$ -го потоку  $j$ -ю чергою:

$$h_{i,j}^x = (k_i^f - k_j^q)^2 + 1, \quad (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}). \quad (4)$$

Метрика  $h_{i,j}^x$  є додатною величиною, значення якої (4) безпосередньо залежать від квадрата розбіжності між класами потоків  $k_i^f$  і черг  $k_j^q$  [9, 13, 15]. У випадку, коли значення класів однакові ( $k_i^f = k_j^q$ ), метрика обслуговування буде мінімальною та дорівнюватиме одиниці ( $h_{i,j}^x = 1$ ). Таким чином, максимальна близькість значень  $k_i^f$  та  $k_j^q$  гарантуватиме направлення пакетів  $i$ -го потоку на обслуговування саме до  $j$ -ї черги.

Другий етап розрахунків представляє собою комплексне вирішення задач активного управління чергами та розподілу ресурсів [13, 15]. Перехід до другого етапу відбувається після вирішення оптимізаційної задачі булевого програмування з критерієм (2)-(3), метрикою (4) та обмеженням (1), коли результат розрахунку множини керуючих змінних  $x_{i,j}$  є вже відомим. Тоді, для вирішення задачі Resource Allocation введемо множини керуючих змінних другого типу  $b_j$  ( $j = \overline{1, M}$ ), кожна з яких визначає об'єм пропускної здатності інтерфейсу, виділений для обслуговування  $j$ -ї черги. Для забезпечення коректності розподілу загальної пропускної здатності інтерфейсу  $b$  між конкретними чергами, на змінні  $b_j$  мають накладатися умови вигляду:

$$0 \leq b_j, \quad \sum_{j=1}^M b_j \leq b, \quad (j = \overline{1, M}). \quad (5)$$

Для можливості реалізації превентивного (завчасного) обмеження інтенсивності потоків, що надходять на вхід інтерфейсу маршрутизатора телекомунікаційної мережі також необхідно ввести множини керуючих змінних третього типу  $y_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ), які за своїм фізичним змістом характеризують частку  $i$ -го потоку пакетів, що отримала відмову в обслуговуванні на інтерфейсі маршрутизатора в ході вирішення задачі AQM [1, 9-23]. Чисельно змінні  $y_i$  будуть визначати ймовірність відкидання пакетів  $i$ -го потоку з сформованої на інтерфейсі маршрутизатора черги та підпорядковуватимуться умові вигляду:

$$0 \leq y_i \leq 1, \quad (i = \overline{1, N}). \quad (6)$$

Задля забезпечення керуваності процесом активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ необхідно задовольнити нелінійне обмеження, яке гарантуватиме, що сумарна інтенсивність потоків, спрямованих на обслуговування в  $j$ -ту чергу, ні в якому разі не перевищить пропускну здатність інтерфейсу, що виділена даній черзі:

$$\sum_{i=1}^N a_i x_{i,j} (1 - y_i) \leq b_j, \quad (j = \overline{1, M}). \quad (7)$$

Умова (7) відображає функціональну взаємодію між собою керуючих змінних усіх трьох типів, пов'язуючи оптимізаційні задачі першого та другого етапів розрахунків. Задоволення (7) гарантує, що сумарна інтенсивність вже відомих, агрегованих згідно метрики (4), потоків пакетів не спричинить перевантаження сформованих на інтерфейсі маршрутизатора ТКМ черг завдяки реалізації функції Active Queue Management та Resource Allocation.

Спираючись на сформульовані умови та обмеження (5) - (7), розрахунок шуканих змінних  $b_j$  та  $y_i$ , що умовно відносяться до другого етапу розрахунків, доцільно здійснити в ході вирішення наступної оптимізаційної задачі:

$$\min_{b,y} P, \quad (8)$$

$$P = \sum_{j=1}^M h_j^b b_j + \sum_{i=1}^N h_i^y a_i y_i, \quad (9)$$

де  $h_j^b$  – метрика, яка характеризує умовну вартість виділення одиниці пропускну здатності інтерфейсу маршрутизатора  $j$ -й черзі;  $h_i^y$  – метрика, яка визначає умовну вартість відмов в обслуговуванні пакетам  $i$ -го потоку.

Використання критерію оптимальності (8), (9) пов'язано як з мінімізацією використання пропускну здатності інтерфейсу маршрутизатора за рахунок її оптимального розподілу, так і з мінімізацією можливих відмов в обслуговуванні, викликаних превентивним обмеженням інтенсивності потоків пакетів.

Метрики  $h_j^b$  та  $h_i^y$ , аналогічно метриці (4), залежать від значень класів потоків  $k_i^f$  та черг  $k_j^q$ . Причому, чим більше клас черги  $k_j^q$ , тим нище значення  $h_j^b$  і тим більше пропускну здатності інтерфейсу буде виділено для обслуговування  $j$ -й черзі. Збільшення класу потоку  $k_i^f$  призводить до зростання значення метрики  $h_i^y$ . Тобто, чим вище значення класу потоку, тим «дорожчими» будуть відмови в обслуговуванні відповідних пакетів.

Виконання умов (5) - (7) в ході вирішення оптимізаційної задачі (8), (9) дозволяє здійснити оптимальний розподіл пропускну здатності інтерфейсу маршрутизатора ТКМ між сформованими чергами та забезпечити диференційоване обмеження інтен-

сивності потоків пакетів за аналогією з механізмом запобігання перевантаження WRED.

Проте, використання лінійної цільової функції (9), як показано в [13], орієнтує на те, що відмови в обслуговуванні починаються з низькокласових потоків. При цьому у випадку перевантаження інтерфейсу пакети потоку з вищим класом обслуговування почнуть відкидатись лише після повного блокування потоків з меншим значенням класу. Так, до тих пір, доки можна відмовити потоку з низьким значенням класу, потік з високим класом обмежуватиметься в обслуговуванні не буде. Тобто реалізується обслуговування на основі так званих абсолютних пріоритетів.

У статті пропонується до використання лінійно-квадратичний вид цільової функції в критерії (8). Тобто замість лінійної скалярної форми (9) рекомендується обрати векторно-матричний вираз виду:

$$P = \vec{b}^t H_b \vec{b} + \vec{y}^t H_y \vec{y} + \vec{h}_b^t \vec{b} + \vec{h}_y^t \vec{y}, \quad (10)$$

де  $\vec{b}$  та  $\vec{y}$  – вектори, координатами яких є шукані керуючі змінні  $b_j$  та  $y_i$  відповідно;  $\vec{h}_b$  та  $\vec{h}_y$  – вектори, координатами яких є коефіцієнти  $h_j^b$  та  $a_i h_i^y$  відповідно;  $H_b$  та  $H_y$  – діагональні матриці, які мають такий вигляд:

$$H_b = \begin{pmatrix} wh_1^b & 0 & \dots & 0 \\ 0 & wh_2^b & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & wh_M^b \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$H_y = \begin{pmatrix} wa_1 h_1^y & 0 & \dots & 0 \\ 0 & wa_2 h_2^y & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & wa_N h_N^y \end{pmatrix}, \quad (12)$$

в яких  $w$  – множник балансування, що встановлює співвідношення вагових коефіцієнтів діагональних матриць  $H_b$ ,  $H_y$  та векторів  $\vec{h}_b$  та  $\vec{h}_y$ . За допомогою цього множника можна регулювати вплив на критерій оптимальності (10), його квадратичного або лінійного членів. Як буде показано нижче, саме задаючи значення множника балансування  $w$ , можливо регулювати процес активного управління чергами, в тому числі з точки зору визначення політики диференційованих відмов в обслуговуванні пакетів.

Отже, основою двоетапного методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ є послідовне та узгоджене вирішення наступних інтерфейсних задач:

- оптимізаційної задачі управління перевантаженнями (2) з критерієм оптимальності (3) та обмеженням (1), метою якої є оптимальний розподіл та агрегація потоків пакетів між сформованими на інтерфейсі маршрутизатора чергами на основі сумірності значень класів потоків та черг, представлених метрикою (4);

▪ оптимізаційної задачі розподілу ресурсів та активного управління чергами, представленої критерієм (8), (10) та обмеженнями (5), (6).

Представлення методу активного управління чергами у вигляді рішення двох задач лінійної оптимізації характеризується припустимою обчислювальною складністю отримання кінцевих рішень.

**Дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційної мережі.** Дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ ґрунтувалося на результатах аналітичних розрахунків, які були отримані в ході використання пакету Optimization Toolbox середовища Matlab при вирішенні оптимізаційних задач Congestion Management, Resource Allocation та Active Queue Management [23-25].

Нехай, в табл. 1 представлені вихідні дані та результати для розрахункового прикладу при використанні лінійної (9) та лінійно-квадратичної (10) цільової функції в критерії оптимальності (8). В рамках даного прикладу, трафік, що надходив на інтерфейс маршрутизатора складався з дванадцяти потоків ( $N=12$ ). Значення класів та інтенсивностей потоків  $k_i^f$  задавалися випадковим чином. Диференціація потоків здійснювалася на основі змісту полів IP-пакета: IP-Precedence, з максимальним значенням класів потоків ( $K=8$ ). Обслуговування потоків здійснювалося в рамках чотирьох черг ( $M=4$ ). Припустимо також, що інтерфейс маршрутизатора зазнавав переважання. Причому, сумарна інтенсивність

потоків в чергах дорівнювала 113,9935 1/с, тоді як пропускна здатність інтерфейсу складала  $b=100$  1/с.

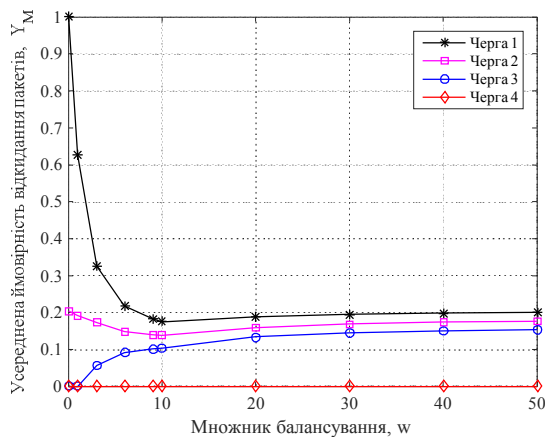
За результатами аналітичних розрахунків, представлених в табл. 1, вдалося підтвердити коректність вирішення поставленої оптимізаційної задачі першого етапу розрахунків (2) - (3) щодо агрегації потоків пакетів та їх подальшого розподілу по відповідним чергам на основі близькості значень класів  $k_i^f$  та  $k_j^q$ . Також вдалося проаналізувати коректність вирішення задач 2-го етапу розрахунків (8) в умовах переважання інтерфейсу маршрутизатора. Так, в табл. 1 можна побачити, що при використанні (9) потоки пакетів з найнижчими значеннями класів  $k_8^f = 2,3227$  та  $k_{10}^f = 2,2846$ , які були направлені до низькокласової черги ( $k_1^q = 1,875$ ), отримували обмеження в обслуговуванні аж до повного блокування. Ймовірність відкидання пакетів з восьмого та десятого потоків дорівнювала одиниці. В той же час, потоки з високими значеннями класів не обмежувалися в обслуговуванні до тих пір доки можна було відмовити потокам з низькими значеннями класів.

При використанні лінійно-квадратичної цільової функції (10) (табл. 1), спостерігався більш справедливий характер використання пропускної здатності інтерфейсу та можливих відмов в обслуговуванні потоків пакетів. Так, відмови в обслуговуванні стосувалися не лише потоків з низькими значеннями класів, а й взагалі усіх потоків, однак більшою мірою – з низькими значеннями класів і меншою – з високими.

Таблиця 1 – Вихідні дані та результати розрахунків при використанні заданих цільових функцій

Характеристика потоків				Характеристика черг			
Лінійна цільова функція (9)							
Номер потоку	$k_i^f$	$a_i$ , (1/с)	$y_i$	Номер черги	$k_j^q$	$c$ (1/с)	$b_j$ , (1/с)
8	2,3227	5,0803	1	1	1,875	13,5506	0
10	2,2846	8,4703	1				
4	4,1565	12,8639	0	2	3,625	33,6509	33,208
6	3,0742	7,228	0,613				
11	3,5794	13,559	0				
1	5,5438	12,9388	0	3	5,375	66,792	66,792
2	6,1221	1,3453	0				
3	5,5342	15,4123	0				
5	4,8291	8,0726	0				
7	6,2128	7,4092	0				
9	5,8074	8,4328	0				
12	5,3793	13,181	0	4	7,125	-	-
-	-	-	-				
Лінійно-квадратична цільова функція (10)							
8	2,3227	5,0803	0,221	1	1,875	13,5506	10,5235
10	2,2846	8,4703	0,225				
4	4,1565	12,8639	0,124	2	3,625	33,6509	28,907
6	3,0742	7,228	0,167				
11	3,5794	13,559	0,143				
1	5,5438	12,9388	0,093	3	5,375	66,792	60,5695
2	6,1221	1,3453	0,084				
3	5,5342	15,4123	0,093				
5	4,8291	8,0726	0,11				
7	6,2128	7,4092	0,083				
9	5,8074	8,4328	0,088				
12	5,3793	13,181	0,096				

На рис. 1 представлено результати аналізу впливу множника балансування  $w$  на характер зміни усередненої за потоками ймовірності відкидання пакетів для кожної з черг  $Y_M$  відповідно до приклада, наведеного в табл. 1. На рис. 1 можна побачити, що за наявності перевантаження інтерфейсу маршрутизатора та у випадку, коли множник балансування  $w$  дорівнює нулю, характер відмов в обслуговуванні є аналогічним до моделі з цільовою функцією (9). Можна стверджувати, що у такому разі обслуговування потоків пакетів здійснюється на основі так званих абсолютних пріоритетів, схожим, наприклад, на модель Priority Queuing (PQ), коли обмеження в обслуговуванні отримують лише потоки низьокласових черг, тоді як черги з високими значеннями класів обслуговуються у повному обсязі (табл. 1) [1-3,17-23].



**Рис. 1.** Аналіз впливу множника балансування  $w$  на характер зміни усередненої ймовірності відкидання пакетів з організованих на інтерфейсі маршрутизатора черг

Збільшення значення множника  $w$  (рис. 1) дозволяє організувати більш справедливе обслуговування потоків пакетів, що базується на т.зв. відносних пріоритетах. Тобто, у разі можливого перевантаження інтерфейсу маршрутизатора, відмови в обслуговуванні будуть стосуватися усіх потоків, однак більшою мірою – з низьокласових черг і меншою – з висококласових (табл. 1). Подібний підхід є схожим, наприклад, до моделі зваженого справедливого обслуговування – Weighted Fair Queuing, WFQ [1, 16-23]. Таким чином, використання моделі управління чергами з лінійно-квадратичною цільовою функцією

(10) та врахуванням значення множника балансування  $w$  дає можливість завчасно обмежувати інтенсивність саме того потоку, який спричинює перевантаження інтерфейсу маршрутизатора телекомунікаційної мережі. Підбір значення  $w$  від 10 до 30, в такому випадку, дозволяє забезпечити плавний характер відмов в обслуговуванні замість стрибкоподібного.

## Висновки

В роботі проведено модифікація та дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ з узгодженим вирішенням задач: управління перевантаженням (Congestion Management), метою якої були оптимальна агрегація та розподіл потоків пакетів за сформованими на інтерфейсі маршрутизатора чергами згідно близькості значень їх класів; розподілу ресурсів (Resource Allocation), метою якої був оптимальний розподіл пропускної здатності інтерфейсу між сформованими на ньому чергами; активного управління чергами (Active Queue Management) та запобігання перевантаженням (Congestion Avoidance), метою якої було забезпечення превентивного (завчасного) обмеження інтенсивності потоків пакетів, що надходять на інтерфейс маршрутизатора телекомунікаційної мережі.

Задача управління перевантаженням буда зведена до оптимізаційної задачі з критерієм оптимальності (3), метрикою (4) та обмеженнями (1). Задачі розподілу ресурсів і запобігання перевантаження (8) з критерієм оптимальності (9) та обмеженнями (5)-(6) були сформульовані у вигляді задачі лінійно-квадратичної оптимізації (10).

Дослідження процесів активного управління чергами, розподілу ресурсу та управління перевантаженням підтвердили ефективність запропонованого методу управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ. У разі перевантаження інтерфейсу маршрутизатора, коректність та адекватність отримуваних за допомогою запропонованого методу рішень, вбачається при застосуванні саме лінійно-квадратичної цільової функції (10). Тобто, у разі перевантаження інтерфейсу маршрутизатора, відмови в обслуговуванні будуть носити збалансований характер: відмови стосуватимуться усіх потоків, однак більшою мірою – з низьокласових черг і меншою – з висококласових. В ході дослідження встановлено, що числове значення множника балансування  $w$  варто обирати в межах від 10 до 30.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rao, D. S.: Queue Management and Quality of Service (QoS) in the Internet: A Novel Approach for Flow Protection for providing Better than Best-Effort Service in the Internet. LAP LAMBERT Academic Publishing (2012).
2. Tan, L.: Resource Allocation and Performance Optimization in Comm. Networks and the Internet. CRC Press (2017).
3. Kamoun, F., Outay, F.: IP/MPLS networks with hardened pipes: service concepts, traffic engineering and design considerations. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2018. pp. 1-8.
4. Monge, A., Szarkowicz, K.: MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services. 1st edition. O'Reilly Media (2016).
5. Li, Y., Panwar, S., Liu, C. J.: On the Performance of MPLS TE Queues for QoS Routing. Vol. 36. Part 3. 2004. pp. 170-174.
6. Berreiros, M., Lundqvist, P.: QOS-Enabled Networks: Tools and Foundations. 2nd Edition. Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, Wiley (2016).
7. Stallings, W.: Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. Addison-Wesley Professional (2015).
8. White, R. Computer Networking Problems and Solutions: An innovative approach to building resilient, modern networks. 1st Edition. Addison-Wesley Professional (2018).

9. Lemeshko, O., Lebedenko, T., Yeremenko, O., Simonenko, O.: Math. Model of Queue Management with Flows Aggregation and Bandwidth Allocation. In: Int. Conf. on Theory & Appl. of Fuzzy Syst. and Soft Comp.. Springer, Cham. 2018. pp. 165-176.
10. Лемешко, А. В., Лебеденко, Т. Н.: Линейная модель оптимального управления очередями на интерфейсе маршрутизатора телекоммуникационной сети. Information Content and Processing. 2017. Vol. 4, №2. С. 171-181.
11. Lebedenko, T., Kholodkova, A., Al-Dulaimi, A.: Linear-Quadratic Model of Optimal Queue Management on Interface of Telecommunication Network Router. In: 2018 Third International Conference Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2018) Proceedings, pp 1-4. IEEE (2018).
12. Lemeshko, O., Hailan, A., Starkova, O.: Multi-level traffic management in the MPLS-TE DiffServ network. In: 2011 11 Int. Confe. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. Proc., pp. 118-120 (2011).
13. Lebedenko, T.: Method of Scheduling and Active Queues Management on Routers Interfaces of Telecommunication Networks. In: Innovative Techn. and Sc. Sol. for Industries. 2 (8). 2019. pp. 54-61. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.8.054
14. Lemeshko, O., Ali, S. Ali, Simonenko, O.: A Queue Management Model on Router of Active Network. In: 2015 Thirteenth Int. Conf. The Experience of Designing and Appl. of CAD Systems in Microelectronics. Proc., pp. 419-421. IEEE (2015).
15. Лебеденко, Т. М., Мокряк, А. А., Симоненко, О. В., Черкасов, А. В., Власенко, А. О.: Вдосконалення та дослідження методу збалансованого управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційної мережі. Проблеми телекомунікацій. 2018. №2(23). С. 62-74. Available at: [http://pt.journal.kh.ua/2018/2/1/182\\_lebedenko\\_queue.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2018/2/1/182_lebedenko_queue.pdf)
16. Semenyaka, M.: Research of Goal Coordination Method for Congestion Management on Telecommunication Network Nodes. In: 2014 The International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer science (TCSET'2014) Proceedings, pp. 501-503. IEEE (2014).
17. Лемешко, О. В., Добрышкин, Ю. Н., Дробот, О. А.: Результаты исследования модели управления трафиком с учётом задаваемых приоритетов для многопродуктового и многопольного случаев. Проблеми телекомунікацій. 2010. №2(2). С. 33-41. Available at: [http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102\\_lemeshko\\_rezults.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_rezults.pdf)
18. Lu, L., Du, H., Liu, R. P.: CHOKeR: A novel AQM algorithm with proportional bandwidth allocation and TCP protection. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014. pp. 637-644. DOI: 10.1109/TII.2013.2278618
19. Wang, P.: Dynamics of Delay Differential Equations in Communications Networks: In the Framework of Active Queue Management. LAP Lambert Academic Publishing (2009).
20. John, J., Balan, R.: Priority Queuing Technique Promoting Deadline Sensitive Data Transfers in Router based Heterogeneous Networks. International Journal of Applied Engineering Research. 12(15). 2017. pp. 4899-4903.
21. Lenas, S., Dimitriou, S., Tsapeli, F., Tsaoussidis, V.: Queue-management architecture for delay tolerant networking. Wired/Wireless Internet Communications. 2011. pp. 470-482. DOI: 10.1007/978-3-642-21560-5\_39
22. Kushwaha, V.: Interaction of High Speed TCPs with Recent AQMs through Experimental Evaluation. International Journal of Computer Network & Information Security. 8(9). 2016. pp. 41-47. DOI: 10.5815/ijcnis.2016.09.06
23. White, R., Tantsura, J. E.: Navigating Network Complexity: Next-generation routing with SDN, service virtualization, and service chaining. Addison-Wesley Professional (2015).
24. Hahn, B., Valentine, D. T.: Essential MATLAB for Engineers and Scientists. Sixth Edition. Academic Press (2016).
25. Klee, H., Allen, R.: Simulation of Dynamic Systems with MATLAB® and Simulink®. Third Edition. CRC Press (2017).

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О. В. Лемешко,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Received (Надійшла) 11.06.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.07.2019

### **Исследование метода активного управления очередями на интерфейсах маршрутизаторов телекоммуникационных сетей**

Т. Н. Лебеденко, Н. В. Головешко, А. В. Холодкова

Представлены результаты исследования метода активного управления очередями на интерфейсах маршрутизаторов телекоммуникационных сетей. Основу метода составляют математические модели линейного и квадратичного программирования. Новизной данных моделей является согласованное и последовательное решение оптимизационных задач: агрегации и распределения потоков пакетов по сформированным на интерфейсе маршрутизатора очередям (управление перегрузкой); распределения пропускной способности интерфейса маршрутизатора между сформированными очередями (распределение ресурса); и обеспечения заблаговременного ограничения интенсивности потоков пакетов, поступающих на вход интерфейса маршрутизатора (активное управление очередями). Проанализировано влияние классов потоков и очередей, вида целевых функций и множителя балансировки на характер распределения потоков по очередям, закрепления частей пропускной способности интерфейса за отдельными очередями и возможных отказов в обслуживании.

**Ключевые слова:** активное управление очередями, управление перегрузкой, распределения ресурсов, предотвращение перегрузки, качество обслуживания.

### **Investigation of the method of active queue management on the interfaces of telecommunication networks routers**

T. Lebedenko, M. Goloveshko, A. Holodkova

The paper presents the results of an investigation of the method of active queue management at the interfaces of telecommunication networks routers. The method is based on mathematical models of linear and quadratic programming. The novelty of these models is a consistent and consistent solution of optimization problems: aggregation and allocation of packet flows over queues formed at the interface (congestion management); distribution of the bandwidth of the router interface between the formed queues (resource allocation), and ensure that the rate of packet flow arriving at the input of the router interface is proactively limited (active queue management). The influence of classes of flows and queues, the type of objective functions and the balancing factor on the character of the distribution of flows among queues, fixing parts of the interface bandwidth to individual queues and possible denials of service are analyzed.

**Keywords:** active queue management, congestion management, resource allocation, congestion avoidance, quality of service.

О. В. Лемешко<sup>1</sup>, А. С. Шаповалова<sup>1</sup>, О. С. Єременко<sup>1</sup>, М. О. Євдокименко<sup>1</sup>, А. М. Хайлан<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup> Університет Ді-Кар, Насірія, Ірак

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ШВИДКОЇ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦІЇ З БАЛАНСУВАННЯМ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ОБМЕЖЕННЯ ТРАФІКА В МЕРЕЖАХ SD-WAN

У роботі запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації із забезпеченням балансування навантаження на принципах Traffic Engineering (TE) та диференційованого обмеження трафіка в територіально-розподілених програмно-конфігурованих мережах. Основу моделі складають умови реалізації багатошляхової маршрутизації сумісно з модифікованими умовами збереження потоку, які враховують пріоритетне обмеження трафіка на границі мережі у випадку її ймовірного перевантаження, викликаного, з одного боку, зростанням навантаження, а з іншого – реалізацією схем захисту елементів мережі та її пропускної здатності в ході швидкої перемаршрутизації. Перевагою запропонованого рішення також є формулювання задачі швидкої перемаршрутизації як оптимізаційної з критерієм, який орієнтує на мінімізацію, по-перше, верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку, що відповідає вимогам концепції TE, а, по-друге, зважених відносно пріоритету відмов в обслуговуванні потоків пакетів на границі мережі. Дослідження процесів швидкої перемаршрутизації з використанням запропонованої моделі на ряді числових прикладів підтвердило адекватність і ефективність отриманих на її основі маршрутичних рішень як щодо забезпечення їх відмовостійкості та балансування навантаження, так і щодо заснованого на пріоритетах обмеження трафіка.

**Ключові слова:** SD-WAN, відмовостійкі мережі, управління трафіком, балансування навантаження, швидка перемаршрутизація, захист пропускної здатності.

### Вступ

На сьогоднішній день впровадження територіально-розподілених програмно-конфігурованих мереж (Software-Defined Wide-Area Network, SD-WAN) є перспективним технологічним рішенням, яке дозволяє поєднати мережні функції та послуги разом зі спрощенням інфраструктури та управління нею [1-3]. При цьому конфігурування мережі відокремлюється від базових мережних функцій, які надаються постачальниками мережних послуг, тим самим досягається більш ефективно використання пропускної здатності, а також забезпечується економія часу для розгортання та реконфігурації мережі під вимоги запитів користувачів. Різноманітні технологічні рішення, політики, інтелектуальні алгоритми маршрутизації, що можуть використовуватися в SD-WAN, повинні допомагати адаптувати мережу щодо диференційованого обслуговування потоків [1-8].

У загальному випадку відповідно до вимог сучасних додатків користувачів можуть бути сформульовані наступні переваги SD-WAN:

- більш ефективно використання мережного ресурсу, при якому SD-WAN обиратиме найбільш придатну транспортну технологію з наявних для того чи іншого додатка, який формує потік даних для передавання мережею;
- краща керованість, яка дозволяє знизити витрати на адміністрування та управління мережею порівняно з традиційними мережами;
- високий рівень мережної безпеки, при якій шифрування потоків даних при їх передачі забезпечує захист при використанні будь-якої транспортної технології;
- гнучкість і масштабованість при перерозподілі пропускної здатності SD-WAN при диференційованому обслуговуванні потоків користувачів, що

генеруються відповідними додатками, в тому числі критичними, яким має бути гарантовано обслуговування мережею.

При цьому слід відзначити, що при виборі того чи іншого технологічного рішення, орієнтованого на розгортання SD-WAN, необхідно забезпечити високий рівень його відмовостійкості до можливих збоїв в апаратному чи програмному забезпеченні мережного обладнання, перевантаження або порушення рівня інформаційної безпеки тощо. Як показав проведений аналіз, важливим технологічним інструментом підвищення надійності мережних рішень є відмовостійка маршрутизація, яка на транспортному рівні реалізована з використанням протоколів швидкої перемаршрутизації (FastReRouting, FRR) [9-15].

Швидка перемаршрутизація заснована на тому, що одночасно з основним шляхом, розраховується і множина резервних маршрутів, на які майже миттєво (40-50 мс) перемикаються потоки пакетів при відмові основного шляху. Проте підтримка базових схем захисту елементів мережі (каналу / вузлу / шляху) та її пропускної здатності забезпечується за рахунок введення надмірності при використанні ресурсу, що, в свою чергу, може негативно позначитись на продуктивності та рівні якості обслуговування (Quality of Service, QoS) у цілому. Тому важливо, щоб, з одного боку, забезпечувалось ефективне (збалансоване) використання доступного мережного ресурсу, наприклад, на принципах Traffic Engineering (TE) [13-22], а з іншого боку, в разі ймовірного перевантаження мережі, варто застосовувати функції обмеження навантаження на мережу, наприклад, інструментарій Traffic Policing (TP) [11, 12].

Слід зазначити, що забезпечення узгодженого вирішення завдань щодо відмовостійкої маршрутизації, балансування навантаження, обмеження трафіка, як правило, супроводжується ускладненням

використовуваних математичних моделей та методів. Це в кінцевому випадку призводить як до підвищення рівня обчислювальної складності, так і до зниження масштабованості їх протокольної реалізації. Як показав аналіз [23], порядок FRR і TE визначається в процесі розв'язання оптимізаційних задач різного рівня складності.

### Основна частина

**1. Огляд рішень щодо швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих мережах** Серед досліджень щодо відмовостійкості в SDN мережах можна виділити роботи [24-27]. Так, наприклад, в [24] запропоновано алгоритм локальної швидкої перемаршрутизації (Local Fast Reroute, LFR) з агрегацією потоків в програмно-конфігурованих мережах. В алгоритмі LFR в разі виявлення відмови каналу зв'язку всі потоки трафіка, уражені відмовою, агрегуються у так званий «великий» потік. Далі контролером SDN розгортається локальний резервний шлях для динамічної перемаршрутизації агрегованого потоку. Таким чином, алгоритм LFR зменшує кількість поточних операцій між контролером SDN і комутаційним обладнанням. Проведені числові результати довели, що LFR забезпечує швидке відновлення працездатності SDN.

Зростаюча складність сучасних мережних додатків та величезний попит на інтернет-ресурси вимагають від SDN здатності адаптуватися до вимог високого ступеню робастності та надійності. Як було сказано вище, в SDN надзвичайно актуальним є саме завдання підвищення відмовостійкості та своєчасне оновлення інформації про стан мережі, яким присвячено дослідження [25]. У ньому визначені нові алгоритми, які спрямовані на покращення пошуку резервних шляхів у мережах великої розмірності при поодиноких відмовах каналів зв'язку з мінімальними часовими витратами на оновлення інформації про стан мережі. Нове рішення спрямоване на підвищення ефективності та зменшення операцій по обробці службової інформації під час відмов каналів зв'язку.

В роботі [27] запропоновано схему адаптивного динамічного обчислення множини шляхів з метою забезпечення ефективного управління мережними ресурсами для організації маршрутизації та розподілу ресурсів за умови централізованого управління програмно-конфігурованою мережею. Така система може забезпечити необхідну інфраструктуру для інтеграції збору даних та аналітики, оцінки продуктивності мережі при використанні різних алгоритмів оптимізації.

З іншої сторони, як показано в роботах [28, 29], необхідність реалізації схеми захисту пропускної здатності мережі, особливо при реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації, як правило, призводить до нелінійної постановки оптимізаційної задачі швидкої перемаршрутизації, що негативно впливає на обчислювальну складність кінцевих протокольних рішень. Крім того, в цих роботах не запропоновано варіанти дій, коли задача не має

рішень, що може бути викликано, наприклад, відсутністю необхідного каналного ресурсу для реалізації схем захисту пропускної здатності мережі, що має місце у випадку її перевантаження. Таким чином, актуальним науковим та прикладним завданням є формалізація та забезпечення узгодженого вирішення таких складних мережних завдань, як швидка перемаршрутизація (FRR), балансування навантаження на принципах TE та обмеження трафіка (TP) у випадку ймовірного перевантаження мережі. Це завдання пропонується розв'язати на підставі розробки відповідної математичної моделі, яка, грунтуючись на досвіді розробки та дослідження моделей QoS маршрутизації з підтримкою TP [28, 29], моделей і методів FRR і TE FRR [30-35], повинна відповідати таким ключовим вимогам:

- врахування особливостей структурної та функціональної побудови SD-WAN;
- підтримка багатошляхової стратегії маршрутизації в мережі;
- реалізація відомих схем забезпечення захисту елементів мережі, а також їх пропускної здатності;
- прийнятна обчислювальна складність та масштабованість кінцевих рішень, які підлягатимуть подальшій протокольній реалізації.

**2. Потокова модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження та підтримкою диференційованого обмеження трафіка.** Припустимо, що структура мережі зв'язку визначається графом  $G = (R, E)$ , де  $R = \{R_i; i = \overline{1, m}\}$  – це множина маршрутизаторів,  $E = \{E_{i,j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$  – множина каналів зв'язку (КЗ). Позначимо через  $R_i^* = \{R_j; \exists E_{j,i} \in E\}$  підмножину маршрутизаторів, які є суміжними для маршрутизатора  $R_i$ . Тоді кількість каналів зв'язку в мережі визначимо через  $n = |E|$ , де кожному з каналів зв'язку поставимо у відповідність його пропускну здатність  $\phi_{i,j}$ .

У моделі з кожним  $k$ -м потоком пов'язано ряд функціональних характеристик:  $s_k$  – маршрутизатор-відправник;  $d_k$  – маршрутизатор-одержувач пакетів;  $\lambda^k$  – середня інтенсивність пакетів (пакетна швидкість)  $k$ -го потоку, що вимірюється в пакетах за секунду (1/с);  $K$  – множина потоків пакетів, що передаються мережею ( $k \in K$ ).

Результатом розв'язання задачі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження на основі Traffic Engineering є обчислення двох типів маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$  та  $\bar{x}_{i,j}^k$ , які характеризують частку інтенсивності  $k$ -го потоку пакетів, які передаються у каналі зв'язку  $E_{i,j} \in E$ , що входить до основного або резервного шляху відповідно. У випадку, коли в SD-WAN використовується багатошляхова стратегія, на маршрутні змінні цих двох типів накладаються обмеження вигляду [30, 31]:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1 \text{ та } 0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq 1. \quad (1)$$



На маршрутні змінні накладаються обмеження, які представлені умовами збереження потоку [28, 29]. Для основного шляху вони мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 0; \\ k \in K, R_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 1 - \beta^k; \\ k \in K, R_i = s_k; \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = \beta^k - 1; \\ k \in K, R_i = d_k; \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $\beta^k$  є часткою інтенсивності  $k$ -го потоку, який при реалізації політики ТР отримує відмову в обслуговуванні (обмежується) на границі мережі при використанні основного шляху. На маршрутні змінні резервного шляху також накладаються умови, подібні до (2) [28]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:E_{i,j} \in E} \bar{x}_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} \bar{x}_{j,i}^k = 0; \\ k \in K, R_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} \bar{x}_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} \bar{x}_{j,i}^k = 1 - \bar{\beta}^k; \\ k \in K, R_i = s_k; \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} \bar{x}_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} \bar{x}_{j,i}^k = \bar{\beta}^k - 1; \\ k \in K, R_i = d_k; \end{array} \right. \quad (3)$$

де  $\bar{\beta}^k$  є часткою інтенсивності  $k$ -го потоку, який обмежується на границі мережі при використанні вже резервного шляху.

**3. Умови захисту каналу, вузла та пропускної здатності при швидкій перемаршрутизації з балансуванням навантаження.** У процесі швидкої багатошляхової перемаршрутизації з балансуванням навантаження при реалізації схеми захисту каналу  $E_{i,j} \in E$  має місце таке обмеження [32]

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k, \quad (4)$$

де  $\delta_{i,j}^k = \begin{cases} 0, & \text{при захисті каналу зв'язку } E_{i,j}; \\ 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (5)$

Виконання лінійних умов (4) і (5) гарантує, що канал  $E_{i,j} \in E$ , який захищається, при багатошляховій маршрутизації не буде використовуватися резервним маршрутом.

У свою чергу, при реалізації схеми захисту вузла  $R_i \in R$  умови (4) і (5) узагальнюються на випадок захисту вже множини каналів зв'язку, інцидентних вузлу, який захищається [32]. Тоді в разі використання багатошляхової стратегії повинні виконуватися такі обмеження:

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k, R_j \in R_i^*, j = \overline{1, m}, \quad (6)$$

де значення  $\delta_{i,j}^k$  визначаються відповідно до (5).

Слід зазначити, що виконання зазначених вище умов (5) і (6) гарантує захист вузла  $R_i \in R$ , забороняючи використання резервним маршрутом усіх каналів, які виходять з даного вузла. Більш того, відповідно до умов (4), так як захисту підлягають лише транзитні маршрутизатори, заборона на використання вихідних каналів зв'язку запобігає включенню до резервного шляху і вхідних каналів. Так реалізується захист конкретного вузла  $R_i$  мережі в цілому.

Умови захисту пропускної здатності SD-WAN фактично відповідають за своїм фізичним змістом умовам запобігання перевантаження каналів зв'язку при реалізації швидкої перемаршрутизації:

$$\sum_{k \in K} \lambda^k \cdot \max[x_{i,j}^k, \bar{x}_{i,j}^k] \leq \varphi_{i,j}, E_{i,j} \in E. \quad (7)$$

Нелінійні умови (7) охоплюють самий загальний випадок, коли перемикаються на резервні маршрути можуть не всі потоки одночасно, а лише деякі з них, так як для різних потоків можуть резервуватися різні елементи (вузли або канали) мережі.

Як показано в роботах [35, 36], в умовах реалізації багатошляхової маршрутизації з метою запобігання перевантаження та забезпечення балансування навантаження в мережі на принципах ТЕ нелінійні умови (7) замінюються лінійними аналогами:

$$\sum_{k \in K} \lambda^k \cdot u_{i,j}^k \leq \alpha \cdot \varphi_{i,j}, E_{i,j} \in E \quad (8)$$

при  $x_{i,j}^k \leq u_{i,j}^k$  та  $\bar{x}_{i,j}^k \leq u_{i,j}^k$  (9)

з деяким розширенням множини керуючих змінних: по-перше, в (8) та (9) вводяться змінні  $u_{i,j}^k$ , кожна з яких характеризує верхній поріг значень відповідних маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$  та  $\bar{x}_{i,j}^k$  (9) для основних та резервних шляхів та відповідає обмеженням

$$0 \leq u_{i,j}^k \leq 1; \quad (10)$$

по-друге, вводиться керуюча змінна  $\alpha$ , яка кількісно визначає верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі, відповідаючи наступним умовам

$$0 \leq \alpha \leq \alpha_{TH}, \quad (11)$$

де  $\alpha_{TH}$  – граничне значення верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку мережі, величина якої попередньо задається на основі аналізу вимог щодо рівня якості обслуговування в мережі.

Це обумовлено тим, що всі основні показники якості обслуговування – продуктивність мережі, середня міжкінцева затримка та ймовірність втрат пакетів є функцією від цього параметра. Чим вище рівень QoS-вимог в мережі, тим нижчим обирається значення порогу  $\alpha_{TH}$ .

Введення умов (11) є новизною запропонованого підходу в порівнянні з моделями, запропонованими в роботах [34, 35].

При цьому, збереження лінійності моделі (1)-(11) і орієнтація на забезпечення заданого рівня QoS можна віднести до основних переваг запропонованого рішення.

Критерієм оптимальності рішення завдання швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження з підтримкою обмеження трафіка буде виступати мінімум наступної цільової функції:

$$J = \sum_{k \in K} w_k \cdot \beta^k + \sum_{k \in K} \bar{w}_k \cdot \bar{\beta}^k + c \cdot \alpha \rightarrow \min, \quad (12)$$

де вагові коефіцієнти повинні відповідати таким умовам

$$w_k > \bar{w}_k > w_p > \bar{w}_p > \dots > c, \quad (13)$$

де пріоритет пакетів  $k$ -го потоку ( $PR^k$ ) перевищує пріоритет пакетів  $p$ -го потоку ( $PR^p$ ).

Наприклад, в IP-мережі у разі використання трьох біт у заголовку пакета для кодування пріоритету його значення знаходиться в діапазоні від 0 до 7, а при використанні політик DSCP (Differentiated Services Code Point) пріоритети змінюються від 0 до 63. Тоді, згідно з (13) пропонується використовувати в критерії (12) такі значення вагових коефіцієнтів:

$$w_k = PR^k + 1, \quad \bar{w}_k = PR^k + 0,5, \quad c = 0,25. \quad (14)$$

Критерій оптимальності (12) фокусується на мінімізації умовних витрат, пов'язаних з погодженим вирішенням завдань FRR, TE та TP. У цьому випадку перший член визначає умовну вартість відмов для підтримки потоків, що передаються за допомогою основних шляхів; другий – умовну вартість відмов у обслуговуванні (обмеженні) потоків, що передаються через резервні шляхи; третій член в (12) описує зважений верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі.

Введена ієрархія значень вагових коефіцієнтів (14) продиктована тим, що на першому місці за важливістю є рішення задачі обмеження трафіка. При цьому, чим вище пріоритет пакетів потоку, тим вагові коефіцієнти повинні бути більшими.

Варто зазначити, що для одного й того ж самого потоку умовна вартість обмеження трафіка при використанні основного шляху повинна бути вищою за подібну вартість при використанні тим же потоком резервного маршруту.

**4. Дослідження запропонованої моделі швидкої перемаршрутизації в мережі SD-WAN.** Проведено аналіз запропонованої моделі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження на різних мережних конфігураціях для різної кількості потоків та їх характеристик.

Особливості моделі продемонструємо на розрахункових прикладах. Структура досліджуваної мережі показана на рис. 1, а в розривах каналів зв'язку мережі вказані їх пропускні здатності. При-

пустимо, що існує необхідність у вирішенні задачі швидкої перемаршрутизації із забезпеченням захисту пропускну здатності мережі та каналу  $E_{11,12}$  для двох потоків:

- перший потік передається від вузла  $R_1$  до вузла  $R_{16}$  зі змінюваною інтенсивністю

$$\lambda^1 = 10 \div 1100 \text{ 1/c та пріоритетом } PR^1 = 4;$$

- другий потік передається від вузла  $R_5$  до вузла  $R_{12}$  зі змінюваною інтенсивністю

$$\lambda^2 = 10 \div 1100 \text{ 1/c та пріоритетом } PR^2 = 1.$$

Таким чином, другий потік має нижчий пріоритет, ніж перший.

Передбачається, що граничне значення верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку мережі обрано таким:  $\alpha_{TH} = 0,75$ .

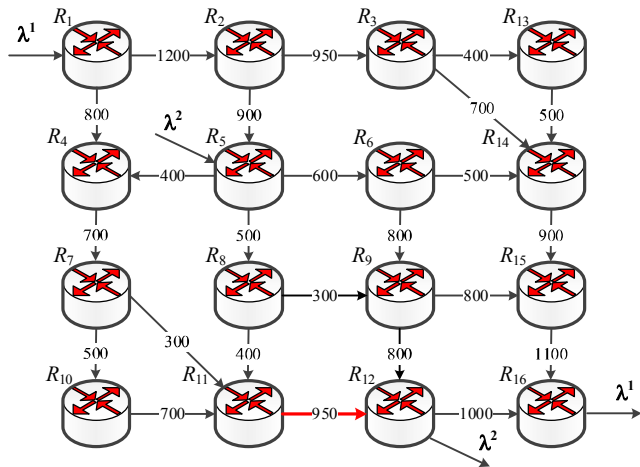


Рис. 1. Структура досліджуваної мережі

Як показали результати досліджень, що представлені на рис. 2, зі зростанням навантаження на мережу, верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі також поступово зростає. Відсутність різких коливань у значеннях  $\alpha$  (рис. 2, а) позитивно впливає на якість обслуговування в мережі в цілому. При цьому при невисокій завантаженості мережі, коли  $\lambda^1 \leq 900$  1/c та  $\lambda^2 \leq 830$  1/c, виконання умови (11) при  $0 \leq \alpha \leq \alpha_{TH}$  не викликало обмеження інтенсивності потоків на границі мережі, тобто  $\beta^1 = \bar{\beta}^1 = \beta^2 = \bar{\beta}^2 = 0$  (рис. 2).

Проте, при надмірному навантаженні на мережу виконання умови (11) забезпечувалось у спосіб, коли  $\alpha = \alpha_{TH}$  (рис. 2 а) за рахунок обмеження інтенсивностей потоків, які протікали як за основними, так і за резервними шляхами. Як видно з рис. 2, обмеження трафіка відбувалось за двома основними принципами:

- обмеження, перш за все, стосувались того потоку, який є джерелом перевантаження за умовою (11);

- якщо перевантаження створювали декілька потоків, то обмеження, перш за все, стосувались потоку з меншим пріоритетом відповідно до умов (13) та (14).

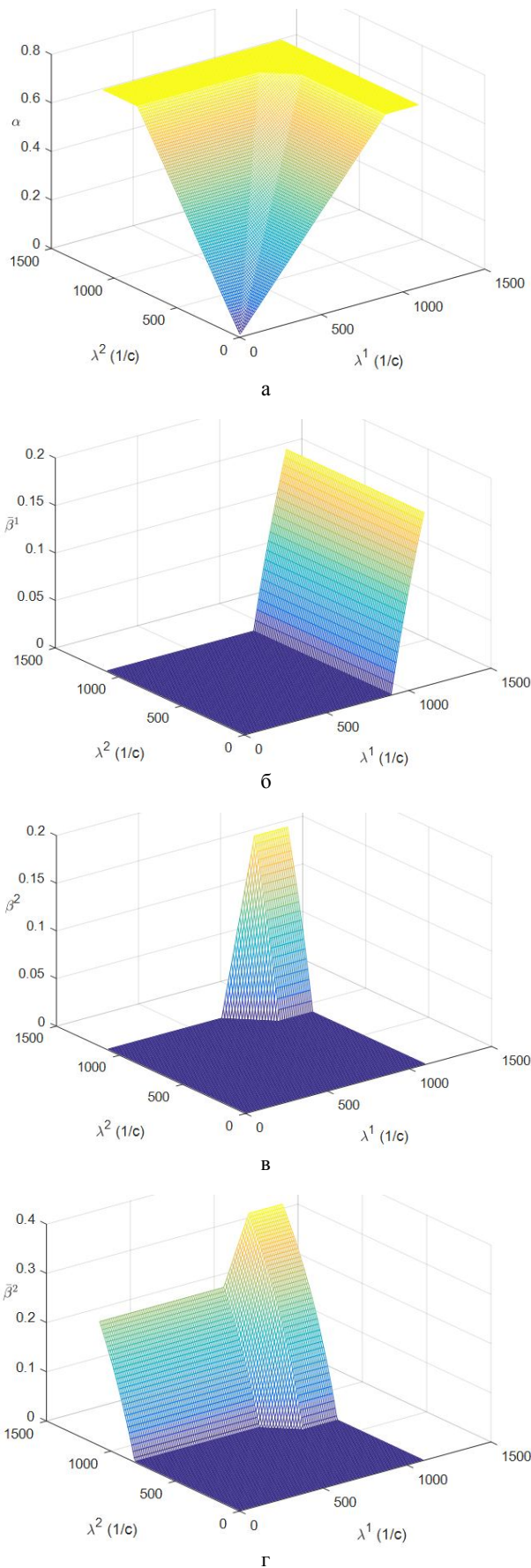


Рис. 2. Результати дослідження для  $\alpha_{TH} = 0,75$

Підтвердженням цих принципів є те, що при зазначених вихідних даних перший (високопріоритетний)

потік пакетів у ході використання основного маршруту за своєю інтенсивністю не обмежувався, тобто  $\beta^1 = 0$ .

Раніше за всіх та з більшою інтенсивністю обмежувався другий (низькопріоритетний) потік при використанні ним резервного шляху (рис. 2, г). Дещо пізніше і з меншою інтенсивністю обмежувався другий потік при використанні ним основного шляху (рис. 2, в). Перший потік, який мав високий пріоритет, обмежувався лише у випадку створення ним перевантаження каналів, що входили до резервного шляху (рис. 2, б).

Для наочності далі розглянемо більш детально отримані результати (рис. 2), коли  $\lambda^1 = 950$  1/с та  $\lambda^2 = 1000$  1/с.

У табл. 1, наведено результати розв'язання задачі TE-FRR-TP для двох описаних потоків. Розрахунок коефіцієнту використання  $\alpha_{i,j}$  для кожного каналу мережі можна провести, як зазначено в [35], за формулою:

$$\alpha_{i,j} = \frac{\sum_{k \in K} u_{i,j}^k \lambda^k}{\Phi_{i,j}}. \quad (15)$$

В умовах перевантаження мережі для забезпечення виконання умови (11) були отримані такі результати розрахунків:

- перший потік, який мав високий пріоритет ( $PR^1 = 4$ ), при використанні резервного шляху буде отримувати відмову обслуговування на границі мережі з інтенсивністю 50 1/с, що відповідає  $\bar{\beta}^1 = 0,0526$ ;

- другий потік, який мав низький пріоритет ( $PR^2 = 1$ ), при використанні основного шляху буде отримувати відмову обслуговування на границі мережі з інтенсивністю 100 1/с, яка відповідає  $\beta^2 = 0,1$ ;

- другий потік, який мав низький пріоритет ( $PR^2 = 1$ ), при використанні резервного шляху отримує відмову обслуговування на границі мережі з інтенсивністю у 325 1/с, яка відповідає  $\bar{\beta}^2 = 0,325$ .

Як показали результати дослідження, модель дозволяє з одного боку забезпечити диференційоване обмеження трафіка на основі пріоритетів, а з іншого – можливість обмеження саме того потоку, який є джерелом перевантажень.

Це проявляється в тому, що при перевантаженні спільно використовуваних розглянутими двома потоками каналів ( $E_{5,4}$ ,  $E_{5,6}$ ,  $E_{5,8}$ ,  $E_{7,11}$  та  $E_{8,9}$ ) обмежувався за своєю інтенсивністю саме другий (менш пріоритетний) потік (табл. 1).

З огляду на ймовірне порушення умови (11), викликане перевантаженням невикористовуваних другим потоком каналів  $E_{1,2}$  та  $E_{14,15}$  (табл. 1), обмежувався і перший (високопріоритетний) потік, як це показано на рис. 2, б.

Таблиця 1 – Порядок багатошляхової маршрутизації двох потоків із застосуванням запропонованої моделі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження з підтримкою обмеження трафіка (захист каналу  $E_{11,12}$ )

Канал зв'язку	Інтенсивність першого потоку в каналах зв'язку		Інтенсивність другого потоку в каналах зв'язку		$\alpha_{i,j}$
	Основний шлях	Резервний шлях	Основний шлях	Резервний шлях	
$E_{1,2}$	788,17	900	0	0	0,75
$E_{2,3}$	592,87	675	0	0	0,74
$E_{1,4}$	161,83	0	0	0	0,68
$E_{2,5}$	195,30	225	0	0	0,69
$E_{3,6}$	406,66	449,18	0	0	0,73
$E_{5,4}$	0	0	300	225	0,75
$E_{5,6}$	113,98	129,87	320,13	320,13	0,75
$E_{4,7}$	161,83	0	300	225	0,73
$E_{5,8}$	81,32	95,13	279,87	129,87	0,75
$E_{6,9}$	86,95	129,87	320,13	320,13	0,72
$E_{7,8}$	0	0	189,75	225	0,75
$E_{8,9}$	52,59	95,13	96,84	129,87	0,75
$E_{7,10}$	161,83	0	110,25	0	0,71
$E_{8,11}$	28,73	0	183,03	0	0,71
$E_{9,12}$	66,14	126,71	416,97	450	0,74
$E_{10,11}$	161,83	0	110,25	0	0,69
$E_{11,12}$	190,56	0	293,28	0	0,71
$E_{3,13}$	186,21	225,82	0	0	0,72
$E_{13,14}$	186,21	225,82	0	0	0,71
$E_{6,14}$	27,03	0	0	0	0,66
$E_{14,15}$	619,90	675	0	0	0,75
$E_{9,15}$	73,40	98,29	0	0	0,67
$E_{15,16}$	693,30	773,29	0	0	0,74
$E_{12,16}$	256,70	126,71	0	0	0,69

Далі розглянемо випадок, коли граничне значення верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку мережі буде мати нижче значення  $\alpha_{TH} = 0,65$ . Відзначимо, що зниження порогового значення  $\alpha_{TH}$  може бути викликано, наприклад,

підвищенням вимог до рівня якості обслуговування.

Результати розрахунків представлені на рис. 3 при вихідних даних для двох потоків, які відповідали попередньому прикладу.

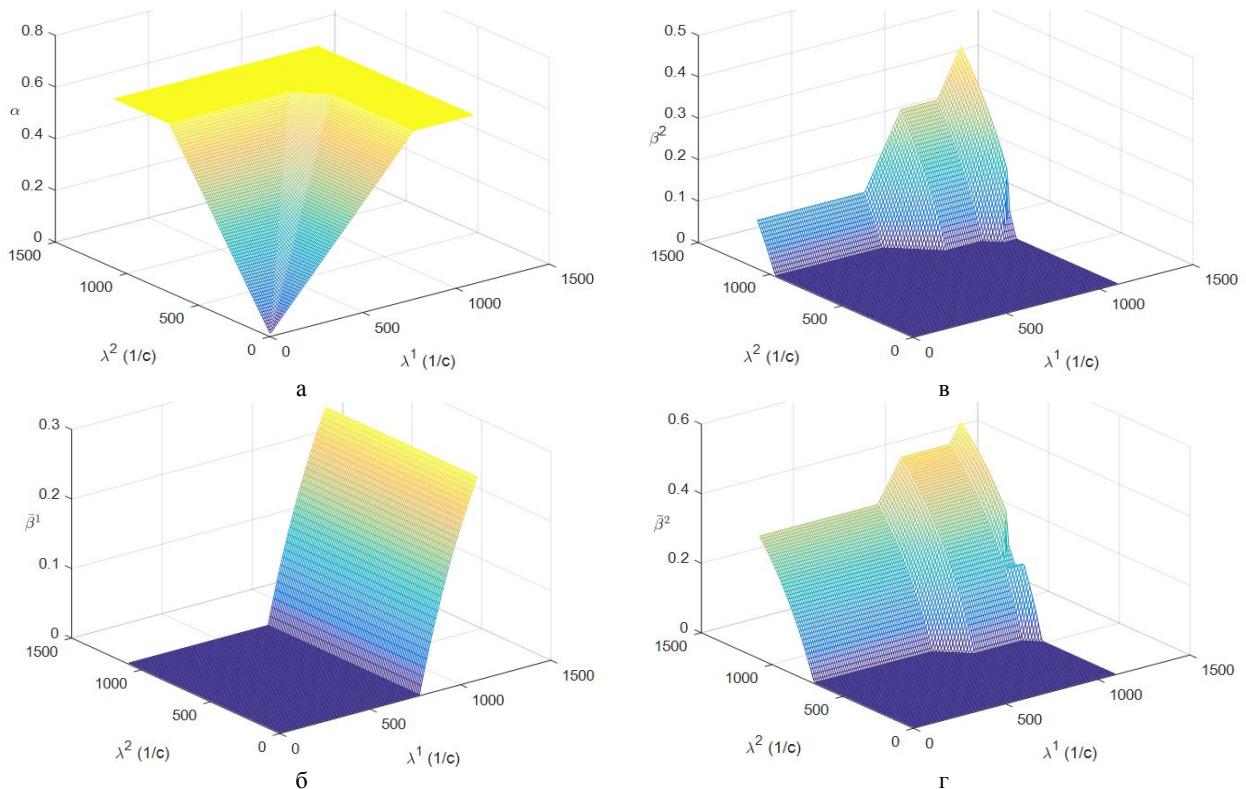


Рис. 3. Результати дослідження для  $\alpha_{TH} = 0,65$

Отримані результати дослідження (рис. 3) підтвердили попередній висновок, що зростання навантаження на мережу призводить до поступового збільшення верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку (рис. 3, а).

Як і раніше, при невисокій завантаженості мережі ( $0 \leq \alpha < \alpha_{TH}$ ), обмеження інтенсивності потоків на границі мережі було відсутнє, тобто  $\beta^1 = \bar{\beta}^1 = \beta^2 = \bar{\beta}^2 = 0$ .

Але завдяки тому, що граничне значення  $\alpha_{TH} = 0,65$  стало більш жорстким, обмеження трафіка починалось при дещо менших значеннях інтенсивностей вхідних потоків:  $\lambda^1 > 780$  1/с,  $\lambda^2 > 720$  1/с (рис. 3, а).

При подальшому збільшенні навантаження на мережу умови (11) виконувались лише при  $\alpha = \alpha_{TH}$  (рис. 3, а) за рахунок обмеження інтенсивностей потоків, які протікали за основними і резервними шляхами. При цьому, як і в попередньому прикладі, обмеження трафіка (Traffic Policing) відбувалось диференційовано згідно до пріоритетів потоків (13) та залежно від того, який саме потік пакетів провокував перевантаження мережі та невиконання умови (11).

Як і в попередньому випадку (рис. 2), при значених вихідних даних перший потік пакетів, який мав високий пріоритет, при використанні основного маршруту за своєю інтенсивністю не обмежувався ( $\beta^1 = 0$ ). З більшою інтенсивністю обмежувався другий потік, який мав низький пріоритет та передавався за резервним шляхом (рис. 3, г). Тоді як при використанні основного шляху другий потік обмежувався менш інтенсивно (рис. 3, в). Перший потік з високим пріоритетом обмежувався лише при перевантаженні каналів, що входили до резервного шляху (рис. 3, б).

## Висновки

1. Рішення з підвищення відмовостійкості SD-WAN на основі реалізації швидкої перемаршрутизації базуються на резервуванні її елементів та пропускної здатності. Тобто введення ресурсної надлишковості є своєрідною платнею за підвищення надійності мережних рішень. Проте резервування мережного ресурсу в ході реалізації тієї чи іншої схеми захисту завжди негативно впливає на продуктивність мережі та рівень якості обслуговування в цілому. Тобто з підвищенням навантаження на мережу реалізація схем захисту елементів мережі, а особливо її пропускної здатності в ході швидкої перемаршрутизації може призвести до нестачі мережного, перш за все, каналного ресурсу та подальшого перевантаження.

2. Встановлено, що ефективним проактивним засобом боротьби з перевантаженням мережі є забезпечення збалансованого використання доступного мережного ресурсу на принципах концепції Traffic Engineering. Дієвим реактивним методом боротьби з перевантаженням є профілювання трафі-

ка, а зокрема обмеження його інтенсивності на границі мережі відповідно до пріоритету обслуговування пакетів. Тому для практики дуже затребуваними є теоретичні рішення щодо забезпечення погодженого розв'язання мережних задач зі швидкої перемаршрутизації на принципах TE та диференційованого обмеження трафіка.

3. У зв'язку з цим у роботі запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження на принципах TE та диференційованим обмеженням трафіка в SD-WAN (1)-(15). Основу моделі складають умови реалізації багатошляхової маршрутизації (1), модифіковані умови збереження потоку (2), (3), які враховують пріоритетне обмеження трафіка на границі мережі у випадку її ймовірного перевантаження, викликаного, з одного боку, зростанням навантаження, а з іншого – реалізацією схем захисту елементів мережі та її пропускної здатності в ході швидкої перемаршрутизації. У роботі адаптовані під нові вимоги умови забезпечення захисту (резервування) вузла, каналу (4)-(6) та пропускної здатності мережі (8)-(10).

4. Перевагою запропонованого рішення також є формулювання задачі TE-FRR-TP як оптимізаційного завдання з критерієм оптимальності (12), який орієнтує на мінімізацію, по-перше, верхнього динамічно керованого порогу завантаженості каналів зв'язку ( $\alpha$ ), що відповідає вимогам концепції TE, а, по-друге, відмов в обслуговуванні на границі мережі, зважених відносно пріоритету та інтенсивності потоків. В ході пріоритетизації потоків, які передаються за основним або резервним шляхом (мультишляхом), необхідно забезпечити виконання умови (13).

5. Як обмеження при оптимізації виступають умови реалізації багатошляхової маршрутизації (1), збереження потоку (2), (3), а також захисту каналу (4), вузла (6) або пропускної здатності мережі (8)-(10). Лінійність сформульованої оптимізаційної задачі забезпечувалась шляхом деякого розширення числа керуючих змінних (8)-(10), які визначають верхній поріг для маршрутних змінних основного та резервного шляхів. Використання запропонованого підходу дозволяє знизити обчислювальну складність розрахунку маршрутних змінних, що відповідають за формування основного та резервного шляхів.

Крім того, забезпечується збалансована завантаженість каналів зв'язку мережі, що відповідає вимогам концепції Traffic Engineering.

6. Дослідження процесів швидкої перемаршрутизації з використанням запропонованої моделі (1)-(15) на ряді числових прикладів (рис. 1 – рис. 3) підтвердило адекватність і ефективність отриманих на її основі маршрутних рішень як щодо забезпечення їх відмовостійкості та балансування навантаження, так і щодо обмеження трафіка. При цьому в ході обмеження трафіка реалізувались два важливі принципи: по-перше, обмеження, перш за все, стосувались того потоку, який є джерелом перевантаження за умовою (11); по-друге, якщо перевантаження створювали декілька потоків, то обмеження,

перш за все, стосувались потоку з меншим пріоритетом відповідно до умов (13).

7. Запропонована модель може стати основою алгоритмічно-програмного забезпечення контроле-

рів SD-WAN, які відповідають за централізований розрахунок множин основних та резервних шляхів при реалізації швидкої перемаршрутизації потоків користувачів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Blokdyk, G.: Software-Defined WAN SD-WAN A Clear and Concise Reference. 5STARCooks (2018)
2. Blokdyk, G.: SD-WAN A Complete Guide. 5STARCooks (2018)
3. Naggi, R., Srivastava, R.: SD-WAN The Networking Blueprint for Modern Businesses. Amazon Digital Services LLC (2018)
4. White, M.B.: Computer Networking: The Complete Guide to Understanding Wireless Technology, Network Security, Computer Architecture and Communications Systems (Including Cisco, CCNA and CCENT). CreateSpace Independent Publishing Platform (2018)
5. Monge, A.S., Szarkowicz, K.G.: MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services. O'Reilly Media (2016)
6. Zaitsev, D.A., Shmeleva, T.R., Retschitzegger, W., Pröll, B.: Security of grid structures under disguised traffic attacks. Cluster Computing. 19(3), 1183-1200 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10586-016-0582-9>
7. Smelyakov, K., Dmitry, P., Vitalii, M., Anastasiya, C. Investigation of network infrastructure control parameters for effective intellectual analysis. In: 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) Proceedings. pp. 983-986. IEEE (2018). <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336359>
8. Ruban, I.V., Churyumov, G.I., Tokarev, V.V., Tkachov, V.M.: Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation. Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security (ITS 2017). CEUR Workshop Processing. 105-111 (2017)
9. Papán, J., Segeč, P., Palúch, P., Mikuš, L., Moravčík, M.: The Survey of Current IPFRR Mechanisms. In: 2015 Federated Conference on Software Development and Object Technologies (SDOT 2015). Advances in Intelligent Systems and Computing, 511, 229-240 (2015). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46535-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46535-7_18).
10. Al-shawi, M., Laurent, A.: Designing for Cisco Network Service Architectures (ARCH) Foundation Learning Guide: CCDP ARCH 300-320. 4th edition, Cisco Press (2017)
11. Misner, I., Hilliard, B.: Networking Like a Pro: Turning Contacts into Connections. Second edition, Entrepreneur Press (2017)
12. Ross, K., Kurose, J.: Computer Networking: A Top-Down Approach, Global Edition. 7th edition, Pearson Higher Education (2016)
13. Golani, K., Goswami, K., Bhatt, K., Park, Y.: Fault Tolerant Traffic Engineering in Software-defined WAN. In: 2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) Proceedings, pp. 01205-01210. IEEE (2018). <https://doi.org/10.1109/ISCC.2018.8538606>
14. Tomovic, S., Radusinovic, I.: A new traffic engineering approach for QoS provisioning and failure recovery in SDN-based ISP networks. In: 2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT) Proceedings, pp. 1-4. IEEE (2018). <https://doi.org/10.1109/SPIT.2018.8350854>
15. Lin, S.C., Wang, P., Luo, M.: Control traffic balancing in software defined networks. Computer Networks, 106, 260-271 (2016)
16. Wang, Y., Wang, Z.: Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering. In: Eight International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No.99EX370) Proceedings, pp. 582-588. IEEE (1999). <https://doi.org/10.1109/ICCCN.1999.805577>
17. Seok, Y., Lee, Y., Kim, C., Choi, Y. Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks. In: Tenth International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No.01EX495) Proceedings, pp. 348-353. IEEE (2001). <https://doi.org/10.1109/ICCCN.2001.956289>.
18. Mendiola, A., Astorga, J., Jacob, E., Higuero, M.: A survey on the contributions of Software-Defined Networking to Traffic Engineering. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 19(2), 918-953 (2017) <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2633579>
19. Prabhavat, S., Nishiyama, H., Ansari, N., Kato, N.: On load distribution over multipath networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 14(3), 662-680 (2012) <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.082511.00013>
20. Koryachko, V.P., Perepelkin, D.A., Byshov, V.S.: Development and research of improved model of multipath adaptive routing in computer networks with load balancing. Aut. Control Comp. Sci. 51(1), 63-73 (2017) <https://doi.org/10.3103/S0146411617010047>
21. Koryachko, V.P., Perepelkin, D.A., Byshov, V.S.: Enhanced Dynamic Load Balancing Algorithm in Computer Networks with Quality of Services. Aut. Control Comp. Sci. 52(4), 268-282 (2018) <https://doi.org/10.3103/S0146411618040077>
22. Perepelkin, D., Byshov, V.: Visual design environment of dynamic load balancing in software defined networks. In: 2017 27th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA) Proceedings, pp. 1-4. IEEE (2017). <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2017.7936643>
23. Wang, N., Ho, K., Pavlou, G., Howarth, M.: An overview of routing optimization for internet traffic engineering. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 10(1), 36-56 (2008) <https://doi.org/10.1109/COMST.2008.4483669>
24. Zhang, X., Cheng, Z., Lin, R., He, L., Yu, S., Luo, H.: Local Fast Reroute With Flow Aggregation in Software Defined Networks. IEEE Communications Letters. 21(4), 785-788 (2017). <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2638430>
25. Malik, A., Aziz, B., Adda, M., Ke, C.H.: Optimisation methods for fast restoration of software-defined networks. IEEE Access 5, 16111-16123 (2017). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2736949>.
26. Rzym, G., Wajda, K., Cholda, P.: SDN-based WAN optimization: PCE implementation in multi-domain MPLS networks supported by BGP-LS. Image Processing & Communications. 22(1), 35-48 (2017). <https://doi.org/10.1515/ipc-2017-0004>

27. Luo, M., Zeng, Y., Li, J., Chou, W.: An adaptive multi-path computation framework for centrally controlled networks. *Computer Networks*, 83, 30-44 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.02.004>
28. Lemeshko, O.V., Garkusha, S.V., Yeremenko, O.S., Hailan, A.M.: Policy-based QoS Management Model for Multiservice Networks. In: 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings, pp. 1-4. IEEE (2015). <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147124>
29. Lemeshko, A.V., Evseeva, O.Y., Garkusha, S.V.: Research on tensor model of multipath routing in telecommunication network with support of service quality by great number of indices. *Telecommun. Radio Eng.* 73(15), 1339–1360 (2014) <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30>
30. Lemeshko, O., Arous, K., Tariki, N.: Effective solution for scalability and productivity improvement in fault-tolerant routing. In: 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T) Proceedings, pp. 76-78. IEEE (2015). <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2015.7357274>
31. Lemeshko, O.V., Yeremenko, O.S.: Dynamics analysis of multipath QoS-routing tensor model with support of different flows classes. In: 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST) Proceedings, pp. 225–230. IEEE (2016). <https://doi.org/10.1109/SST.2016.7765664>
32. Yeremenko, O.S., Lemeshko, O.V., Tariki, N.: Fast ReRoute Scalable Solution with Protection Schemes of Network Elements. In: 2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON) Proceedings, pp. 783-788. IEEE (2017). <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100353>
33. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Hailan, A.M.: Two-level Method of Fast ReRouting in Software-Defined Networks. In: 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T) Proceedings, pp. 376-379. IEEE (2017). <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246420>
34. Lemeshko, O., Yeremenko, O.: Enhanced method of fast re-routing with load balancing in software-defined networks. *Journal of Electrical Engineering*, 68(6), 444-454 (2017). <https://doi.org/10.1515/jee-2017-0079>
35. Lemeshko, O., Yeremenko, O.: Linear optimization model of MPLS Traffic Engineering Fast ReRoute for link, node, and bandwidth protection. In: 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), pp. 1009-1013. IEEE (2018). <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336365>.
36. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M.: MPLS Traffic Engineering Solution of Multipath Fast ReRoute with Local and Bandwidth Protection In: *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 938. Springer, pp. 113-125.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Д. В. Агеев,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків  
Received (Надійшла) 10.06.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.08.2019

**Математическая модель быстрой перемаршрутизации с балансировкой нагрузки и дифференцированного ограничения трафика в сети SD-WAN**

А. В. Лемешко, А. С. Шаповалова, А. С. Єременко, М. А. Евдокименко, А. М. Хайлан

В работе предложена математическая модель быстрой перемаршрутизации с обеспечением балансировки нагрузки на принципах Traffic Engineering (TE) и дифференцированного ограничения трафика в территориально-распределенных программно-конфигурируемых сетях. Основу модели составляют условия реализации многопутевой маршрутизации совместно с модифицированными условиями сохранения потока, которые учитывают приоритетное ограничение трафика на границе сети в случае ее возможной перегрузки, вызванной, с одной стороны, ростом нагрузки, а с другой – реализацией схем защиты элементов сети и ее пропускной способности в ходе быстрой перемаршрутизации. Преимуществом предлагаемого решения также является формулировка задачи быстрой перемаршрутизации как оптимизационной с критерием оптимальности, который ориентирован на минимизацию, во-первых, верхнего порога динамичного управления загруженностью каналов связи, который соответствует требованиям концепции TE, а, во-вторых, отказов в обслуживании на границе сети, взвешенных относительно приоритета и интенсивности потоков. Исследование процессов быстрой перемаршрутизации с использованием предложенной модели на ряде числовых примеров подтвердило адекватность и эффективность полученных на ее основе маршрутных решений как по обеспечению их отказоустойчивости и балансировки нагрузки, так и по основанному на приоритетах ограничениях трафика.

**Ключевые слова:** SD-WAN, отказоустойчивость сетей, управление трафиком, балансировка нагрузки, быстрая перемаршрутизация, защита пропускной способности.

**Mathematical model of Fast ReRouting with load balancing and differentiated traffic policing in the SD-WAN network**

O. Lemeshko, A. Shapovalova, O. Yeremenko, M. Yevdokymenko, A. Hailan

The article is proposed a mathematical model of Fast ReRoute with load balancing based on Traffic Engineering principles and differentiated traffic policing in SD-WAN architectures. The use of the proposed model allows reducing the computational complexity of calculating routing variables responsible for the formation of the primary and backup paths. In addition, this model provides load balancing of network communication links in accordance with the requirements of the Traffic Engineering concept. The study of Fast ReRoute processes using the proposed model on a number of numerical examples confirmed the adequacy and effectiveness of routing solutions derived from it, both in terms of their resiliency, load balancing, and on priority-based traffic policing.

**Keywords:** SD-WAN, Network Resilience, Traffic Engineering, Fast ReRoute, Traffic Policing, Bandwidth Protection.

О. М. Маковейчук<sup>1</sup>, І. В. Рубан<sup>1</sup>, Г. В. Худов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ІНВЕРСНИХ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ БЛОЧНИХ ПЕРЕСТАНОВОК

**Предметом** вивчення в статті є метод знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок пікселів у зображенні. **Метою** є розробка "сліпого" методу знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок за допомогою генетичних алгоритмів. **Завдання:** провести аналіз факторів, що впливають на інверсні псевдовипадкові блочні перестановки на зображенні, розробити метод кодування перестановок в генетичних алгоритмах, обґрунтувати вибір цільової функції для оптимізації за допомогою генетичних алгоритмів. Використовуваними **методами** є: методи цифрової обробки зображень, теорії ймовірності, математичної статистики, криптографії та захисту інформації, математичний апарат теорії матриць. Отримані такі **результати**. Проведено аналіз факторів, що впливають на інверсні псевдовипадкові блочні перестановки на зображенні. Визначено фактори, що впливають на максимальний розмір блоку, при якому ще можливе знаходження інверсної перестановки. Розроблено метод знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок пікселів у перматованому зображенні за допомогою генетичних алгоритмів. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Встановлено, що знаходження інверсних перестановок можливе лише при умові, що розмір блоку є менший за радіус кореляції зображення. Запропоновано ефективний спосіб кодування перестановок, при якому стандартні оператори генетичних алгоритмів будуть породжувати нові і тільки допустимі перестановки. Запропоновано у якості цільової функції використовувати суму квадратів градієнтів. Показано, що дана цільова функція має глобальний мінімум для коректної перестановки, що дозволяє знаходити інверсні блочні перестановки "всліпу" без додаткової апріорної інформації.

**Ключові слова:** генетичні алгоритми, інверсна псевдовипадкова блочна перестановка, перматовані зображення, (псевдо)голографічне кодування, радіус кореляції.

*I have never encountered any problem where genetic algorithms seemed to me the right way to attack it. Further, I have never seen any computational results reported using genetic algorithms that have favorably impressed me.*

*Я особисто ніколи не стикався ні з одним завданням, для вирішення якого генетичні алгоритми виявилися б найкращим засобом. Більш того, я ніколи не зустрічав ніяких результатів обчислень, отриманих за допомогою генетичних алгоритмів, які б справляли на мене позитивне враження.*

*Steven Skiena [1, p. 267]*

### Вступ

#### Постановка проблеми у загальному вигляді.

Автори спробують довести, що скепсис твердження, що було винесено в епіграф, є дещо передчасним. У даний час у зв'язку з широким розповсюдженням цифрового медіаконтенту актуальним є питання захисту інформації від спотворення, незаконного використання тощо.

В ряді публікацій (див., наприклад, роботи [2-5] і цитовану в них літературу) пропонується з криптографічною метою використовувати блочні псевдовипадкові перестановки пікселів. При цьому вважається, що криптографічна стійкість цих методів є дуже високою, оскільки навіть для порівняно невеликого розміру блоку 8x8 загальна кількість комбінацій є надзвичайно великою  $64! \approx 1.27e+89$ .

У даній роботі на основі підходящої моделі формування зображення виводяться обмеження на розмір блоку і пропонується ефективний спосіб "сліпого" (без залучення додаткової апріорної інформації) відновлення перкутованого (від англ. "permutation" – перестановка) зображення за допомогою ге-

нетичного алгоритму. Вхідними параметрами алгоритму є тільки розмір блоку і саме перматоване зображення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Генетичні алгоритми (ГА) належать до класу еволюційних алгоритмів і широко використовуються для вирішення оптимізаційних задач. ГА є метаевристикою, що моделює природний відбір рішень з використанням операторів мутації, схрещування та відбору [6-8].

В задачах обробки зображень і комп'ютерного зору ГА використовуються здебільшого для стегаграфії [9, 10], побудови стереопар [11], сегментації зображень [12], пошуку оптимальних шляхів на графах [13] та інше [14].

Властивості перматованих зображень (іноді у не-англомовній літературі використовується термінологія "(псевдо)голографічне кодування") досліджуються у роботах [15-25].

Існуючі методи вирішення задач відновлення перматованих зображень базуються на еволюційних алгоритмах оптимізації, зокрема за допомогою генетичних алгоритмів [26-30].

Основним недоліком відомих методів є необхідність додаткової апріорної інформації.

**Метою статті** є розробка ефективного методу "сліпого" визначення інверсних псевдовипадкових блочних перестановок на зображеннях на основі генетичних алгоритмів.

### Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Нехай  $f$  – вихідне зображення, з якого за допомогою блочної перестановки пікселів (псевдовипад-



кової, але однакової для кожного блоку) отримується пермuted зображення  $g$ . Тобто вихідне зображення  $f$  розбивається на квадратні блоки розміром  $b \times b$  у кожному з яких пікселі переставляються однаковим чином. Схематично це можна записати як

$$g^{(n)} = f^{(n)}(p), \quad (1)$$

де  $n$  нумерує блок,  $p$  – задана перестановка (вектор індексів довжиною  $b^2$  елементів).

Необхідно знайти перестановку  $p$  і відновити вихідне зображення  $f$ , знаючи тільки пермuted зображення  $g$  і розмір блоку  $b$ .

Для вирішення указаної задачі будемо використовувати ГА.

Існуючі імплементації ГА найбільш пристосовані до представлення генома як вектора дійсних чисел, тому необхідно знайти ефективний спосіб кодування перестановок (які природним чином представляють собою вектор індексів), такий що основні оператори ГА (мутація, схрещування тощо) породжували інші допустимі перестановки, що рівномірно покривають область допустимих значень. Ця задача не є тривіальною.

В роботі при розробці способу кодування перестановок в геномі буде запропоновано використовувати підхід, що наведений у MATLAB в імплементації функції `gandperm` [31], а саме кодувати геном як вектор дійсних чисел, сортувати їх за зростанням, отримуючи вектор індексів розташування елементів у відсортованому масиві, який і задає перестановку.

Легко бачити, що при такому способі кодування перестановок стандартні оператори ГА будуть породжувати нові і тільки допустимі перестановки. Обчислювальна складність цього способу, очевидно, така ж сама як й у алгоритмів сортування  $\sim O(N \log(N))$ , де  $N = b^2$  – довжина генома (кількість змінних у задачі).

Для вибору цільової функції скористаємось тим, що псевдовипадкові перестановки роблять сусідні пікселі зображення некорельованими, отже середня різниця яскравості для пермuted зображення зростає. Тому підходящою буде будь-яка неспадаюча функція від модуля градієнта зображення  $|\nabla g|$ , наприклад,

$$S = \frac{1}{4} \langle |\nabla g|^2 \rangle, \quad (2)$$

де трикутні дужки  $\langle \dots \rangle$  позначають операцію усереднення, а коефіцієнт  $1/4$  введено з міркувань зручності.

Представимо функцію, що задається рівнянням (1) у явному вигляді:

$$S = \frac{1}{4 \cdot w \cdot h} \sum_x \sum_y \left( (g_{x+1,y} - g_{x,y})^2 + (g_{x,y+1} - g_{x,y})^2 \right), \quad (3)$$

де  $w, h$  – довжина і ширина зображення відповідно, а сумування проводиться по всіх координатах  $x$  та  $y$ .

Враховуючи, що

$$\begin{aligned} \langle |\nabla g|^2 \rangle &= \langle |\nabla_x g|^2 + |\nabla_y g|^2 \rangle = \\ &= \langle |\nabla_x g|^2 \rangle + \langle |\nabla_y g|^2 \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

і, що з міркувань відсутності виділеного напрямку у пермuted зображенні очевидно, що

$$\langle |\nabla g|^2 \rangle = \langle |\nabla_y g|^2 \rangle, \quad (5)$$

то достатньо розглянути тільки

$$\langle |\nabla_x g|^2 \rangle = \frac{1}{w \cdot h} \sum_x \sum_y (g_{x+1,y} - g_{x,y})^2. \quad (6)$$

Розпишемо вираз (6):

$$\langle |\nabla_x g|^2 \rangle = \frac{1}{w \cdot h} \sum_x \sum_y \left( g_{x+1,y}^2 + g_{x,y}^2 - 2g_{x+1,y} \cdot g_{x,y} \right), \quad (7)$$

і, усереднюючи вираз у дужках, врахуємо що для некорельованих пікселів середні квадратів співпадають:

$$\frac{1}{w \cdot h} \sum_x \sum_y g_{x+1,y}^2 = \frac{1}{w \cdot h} \sum_x \sum_y g_{x,y}^2 = \langle g^2 \rangle \quad (8)$$

а середні добутків – це є просто добутки середніх:

$$\frac{1}{w \cdot h} \sum_x \sum_y g_{x+1,y} g_{x,y} = \langle g \rangle^2, \quad (9)$$

Таким чином,

$$\langle |\nabla_x g|^2 \rangle = \langle |\nabla_y g|^2 \rangle = 2 \langle g^2 \rangle - 2 \langle g \rangle^2 = 2D(g), \quad (10)$$

де  $D(g)$  – дисперсія зображення  $g$ , що розраховується стандартним чином. Отже, маємо

$$\frac{1}{4} \langle |\nabla g|^2 \rangle = \frac{1}{4} \langle |\nabla_x g|^2 \rangle + \frac{1}{4} \langle |\nabla_y g|^2 \rangle = D(g), \quad (11)$$

оскільки дисперсія (як і середнє значення) не залежать від порядку відліків, то

$$D(g) = D(f) = D_0. \quad (12)$$

Таким чином, у початковий момент часу  $t=0$  значення цільової функції дорівнює дисперсії зображення

$$S(t=0) = D_0. \quad (13)$$

Виникає питання – наскільки зміниться значення цільової функції у процесі оптимізації? Зрозуміло, що у випадку збіжності алгоритму, у певний момент часу  $t_c$  будемо мати:

$$S(t=t_c) = \frac{1}{4} \langle |\nabla f|^2 \rangle, \quad (14)$$

тому для відповіді на поставлене питання необхідно оцінити величини  $D(g)=D(f)$  і значення  $\langle |\nabla f|^2 \rangle$ , для оцінки якого будемо вважати, що вихідне (непермuted) зображення  $f$  є реалізацією двовимірного

випадкового процесу [32] і, як буде показано нижче, функція розподілу цього процесу може бути довільною. У найпростішому випадку зображення  $f$  формується в результаті згортки зображення  $r$ , що складається з рівномірно розподілених на інтервалі  $[0, 1]$  випадкових пікселів, з лінійним усереднюючим фільтром  $u$  з квадратною апертурою розміру  $a \times a$

$$f = r * u, \quad (15)$$

або 
$$f_{x,y} = \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a r_{x+i,y+j}, \quad (16)$$

Розрахуємо спочатку  $\langle |\nabla_x f|^2 \rangle$ . Аналогічно до формули (6)

$$\langle |\nabla_x f|^2 \rangle = \frac{1}{w \cdot h} \sum_x \sum_y (f_{x+1,y} - f_{x,y})^2, \quad (17)$$

З урахуванням (16) маємо, що

$$\langle |\nabla_x f|^2 \rangle = \frac{1}{w \cdot h} \sum_x \sum_y \left( \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a r_{x+1+i,y+j} - \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a r_{x+i,y+j} \right)^2, \quad (18)$$

або

$$\langle |\nabla_x f|^2 \rangle = \frac{1}{w \cdot h} \sum_x \sum_y \left( \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a \begin{pmatrix} r_{x+1+i,y+j} \\ -r_{x+i,y+j} \end{pmatrix} \right)^2, \quad (19)$$

різниця у дужках легко розписується як

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a \begin{pmatrix} r_{x+1+i,y+j} \\ -r_{x+1,y+j} \end{pmatrix} = \sum_{j=1}^a \begin{pmatrix} r_{x+a+1,y+j} \\ -r_{x+1,y+j} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Квадрат цієї суми в свою чергу можна представити як

$$\left( \sum_{j=1}^a \begin{pmatrix} r_{x+a+1,y+j} \\ -r_{x+1,y+j} \end{pmatrix} \right)^2 = \sum_{j=1}^a \begin{pmatrix} r_{x+a+1,y+j} \\ -r_{x+1,y+j} \end{pmatrix}^2 + \sum_{j \neq j'} \begin{pmatrix} r_{x+a+1,y+j} \\ -r_{x+1,y+j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{x+a+1,y+j'} \\ -r_{x+1,y+j'} \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Усереднюючи, маємо

$$\left\langle \sum_{j=1}^a (r_{x+a+1,y+j} - r_{x+1,y+j})^2 \right\rangle = 2a \left( \langle r^2 \rangle - \langle r \rangle^2 \right) = 2aD(r), \quad (22)$$

$$\left\langle \sum_{j \neq j'} \begin{pmatrix} r_{x+a+1,y+j} \\ -r_{x+1,y+j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{x+a+1,y+j'} \\ -r_{x+1,y+j'} \end{pmatrix} \right\rangle = a(a-1) \left( \langle r^2 \rangle - \langle r \rangle^2 - \langle r \rangle^2 + \langle r \rangle^2 \right) = 0. \quad (23)$$

Отже

$$\langle |\nabla_x f|^2 \rangle = \langle |\nabla_y f|^2 \rangle = \frac{1}{a^4} \cdot 2aD(r) = \frac{2D(r)}{a^3}. \quad (24)$$

і, відповідно,

$$\frac{1}{4} \langle |\nabla f|^2 \rangle = \frac{1}{4} \langle |\nabla_x f|^2 \rangle + \frac{1}{4} \langle |\nabla_y f|^2 \rangle = \frac{1}{a^3} D(r). \quad (25)$$

Зауважимо, що при  $a = 1$  вираз (25) переходить у вираз (11), як і повинно бути. З іншого боку,

$$D(f) = \langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2. \quad (26)$$

Оскільки (за побудовою)

$$\langle u \rangle = 1, \quad (27)$$

то 
$$\langle f \rangle = \langle r * u \rangle = \langle r \rangle. \quad (28)$$

Розрахуємо тепер

$$\langle f^2 \rangle = \frac{1}{w \cdot h} \sum_x \sum_y \left( \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a r_{x+1+i,y+j} \right)^2, \quad (29)$$

що дає

$$\langle f^2 \rangle = \left( a^2 \langle r^2 \rangle + 2 \binom{a^2}{2} \langle r \rangle^2 \right) / a^4, \quad (30)$$

де 
$$\binom{a^2}{2} = \frac{a^2!}{(a^2-2)!2!}. \quad (31)$$

Отже

$$\langle f^2 \rangle = \frac{1}{a^4} \left( a^2 \langle r^2 \rangle + a^2 (a^2 - 1) \langle r \rangle^2 \right), \quad (32)$$

збираючи подібні члени маємо:

$$\begin{aligned} \langle f^2 \rangle &= \left( a^2 \langle r^2 \rangle + (a^4 - a^2) \langle r \rangle^2 \right) / a^4 = \\ &= \left( \langle r^2 \rangle - \langle r \rangle^2 \right) / a^2 + \langle r \rangle^2. \end{aligned} \quad (33)$$

Отже

$$D(f) = \frac{1}{a^2} \left( \langle r^2 \rangle - \langle r \rangle^2 \right) = \frac{1}{a^2} D(r). \quad (34)$$

Таким чином маємо, що цільова функція на нульовій ітерації приймає значення:

$$S(t=0) = D(f) = \frac{1}{a^2} D(r), \quad (35)$$

а на ітерації, коли алгоритм знайшов правильну перестановку:

$$S(t=t_c) = \frac{1}{4} \langle |\nabla f|^2 \rangle = \frac{1}{a^3} D(r), \quad (36)$$

і їх відношення при цьому є таким:

$$\frac{S(t=t_c)}{S(t=0)} = \frac{1}{a}. \quad (37)$$

Тобто, у даній моделі формування зображення, для будь-якого закону розподілу  $r$ , значення цільової функції у процесі оптимізації зменшується у  $a$  разів. Зауважимо, що параметр  $a$  у цьому випадку відіграє роль радіуса кореляції [33], отже будь-який алгоритм зможе відновити перматоване зображення, тільки якщо розмір блоку пермутації менше радіуса кореляції

$$b < a = \frac{D(f)}{\frac{1}{4} \langle |\nabla f|^2 \rangle}. \quad (38)$$

Зворотне твердження також справедливе – якщо умова (38) не виконується, тобто  $b \gg a$ , то завжди можна знайти такі перестановки, які переведуть дане зображення у будь-яке інше (рис. 1) оптимальним у сенсі заданої цільової функції чином.



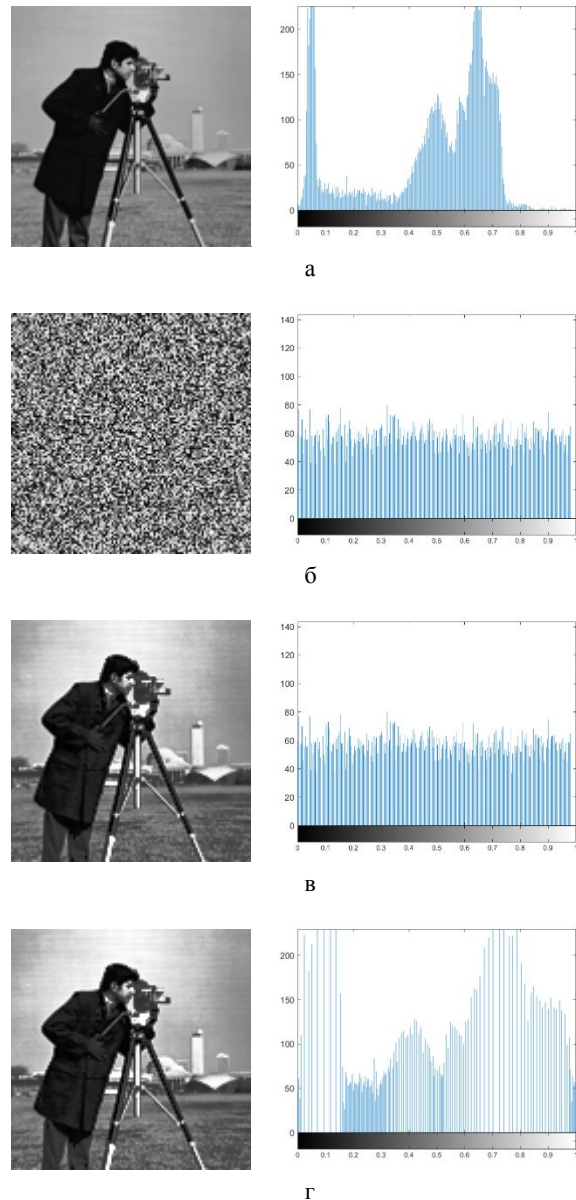
**Рис. 1.** Приклади зображень, що складаються з тих самих пікселів, розташованих у іншому порядку, зліва – псевдовипадкова перестановка, справа – відновлене зображення: а – ‘Cameraman’; б – ‘Baboon’

Це твердження досить очевидно, якщо розглядаються глобальні перестановки, тобто в якості блоку перестановки береться зображення в цілому, оскільки такі операції як, наприклад, віддзеркалення, транспонування чи повороти на кути, кратні  $\pi/2$ , вочевидь не змінюють значення цільової функції (2).

Зауважимо, що для зображення, що складається з випадкових пікселів, яскравість яких рівномірно розподілена на інтервалі  $[0, 1]$ , знаходження такої (глобальної) перестановки, яка переводить його у інше (цільове) зображення, еквівалентно операції вирівнювання гистограми цільового зображення (при цьому, якщо порівнювати візуально, то перматоване і вирівняне зображення є досить подібними, але розподіл по яскравості у перматованого суттєво більш рівномірний, рис. 2).

Експериментальні результати отримано за допомогою MATLAB 9.4.0.813654 (R2018a) з викорис-

танням Global Optimization Toolbox Version 3.4.4 [33].



**Рис. 2.** Вирівнювання гистограм, зліва – зображення, справа – його гистограма: а – вихідне зображення ‘Cameraman’; б – зображення, що складається з випадкових пікселів, яскравість яких рівномірно розподілена на інтервалі  $[0, 1]$ ; в – результат перестановки пікселів зображення; г – результат застосування операції вирівнювання гистограми для зображення а

Параметри генетичного алгоритму (якщо їх значення відрізняються від значень по замовчуванню), що використовувались для моделювання, наведено у табл. 1.

Всі експерименти проводилися з однаковим набором параметрів.

Для того, щоб алгоритм автоматично зупинявся, коли знайдена правильна перестановка, цільова функція для кожного виду зображень (що задається виразом (2)) була зменшена на значення цільової функції вихідного зображення.

Таблиця 1 – Параметри ГА, що використовувалися для моделювання

Параметр генетичного алгоритму	Значення	Примітка
'PopulationSize'	10000	Розмір популяції
'EliteCount'	5000	Додатне ціле число, яке визначає, скільки індивідумів у поточному поколінні гарантовано виживе до наступного покоління
'Generations'	50000	Максимальна кількість ітерацій перед тим, як алгоритм зупиниться
'StallGenLimit'	1000	Алгоритм зупиняється, якщо стільки ітерацій середня відносна зміна найкращого значення цільової функції менше або дорівнює значенню Function Tolerance
'StallTimeLimit'	50000	Алгоритм зупиняється, якщо немає покращення цільової функції протягом Max Stall Time секунд
'TolFun'	0	Відносна зміна найкращого значення цільової функції
'CreationFcn'	@gacreationuniform	Функція, що створює початкову популяцію
'CrossoverFcn'	@crossoverscattered	Функція, що алгоритм використовує для створення кросоверів нащадків
'CrossoverFraction'	0.8	Частка популяції у наступному поколінні, не рахуючи елітних нащадків, що створює функція кросовера
'MutationFcn'	{@mutationuniform, 0.8}	Функція, що використовується для мутації нащадків
'FitnessLimit'	0	Якщо цільова функція досягає цього значення, то алгоритм зупиняється

Таким чином її мінімальним значенням буде 0, що і є умовою зупинки алгоритму (задається параметром 'Fitness Limit' рівним 0).

Зауважимо, що від цієї умови можна відмовитися (в дусі чисто "сліпого" підходу), замінивши її більш жорсткою умовою на кількість ітерацій, при яких цільова функція не міняється (параметр 'Stall Gen Limit').

Експериментальні результати отримано за допомогою MATLAB 9.4.0.813654 (R2018a) з використанням Global Optimization Toolbox Version 3.4.4 [34].

Для експериментів було використано такі вихідні зображення (рис. 3):

'Cameraman' (Copyright Massachusetts Institute of Technology, використано з [34]);

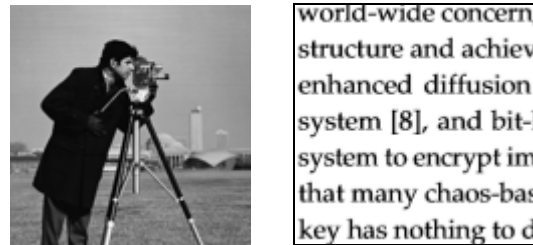
'Текст' (скріншот з програми Adobe Acrobat Reader DC [35] під час перегляду англійської статті).

Всі зображення були перемасштабовані до однакового розміру (120 × 120), представлені у градаціях сірого і динамічний діапазон яскравості нормовано на 1.

**Результати обробки зображення 'Cameraman'.** Експерименти проведено для різних значень розміру блоку  $b=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ .

При всіх цих значеннях ГА знаходив правильну перестановку (рис. 4).

**Результати обробки зображення 'Текст'.** Було проведено експерименти для різних значень розміру блоку  $b = 2, 3, 4, 5, 6$  (рис. 5).



а б  
Рис. 3. Вихідні зображення:  
а – 'Cameraman'; б – 'Текст'

Значення коефіцієнта кореляції (порахованого різними способами) для вихідних зображень наведено у табл. 2.

На рис. 7 представлені автокореляційні функції (АКФ) для вихідних і перемішаних зображень, зауважимо, що ці АКФ є суттєво анізотропними.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнта кореляції (порахованого різними способами) для вихідних зображень, що використовувалися для моделювання

Зображення	Коефіцієнт кореляції		Максимальне значення блоку
	за формулою (38)	за формулою [30, 5.47]	
'Cameraman'	24.0368	47.1123	$b = 8$
'Текст'	04.1073	43.6819	$b = 4$



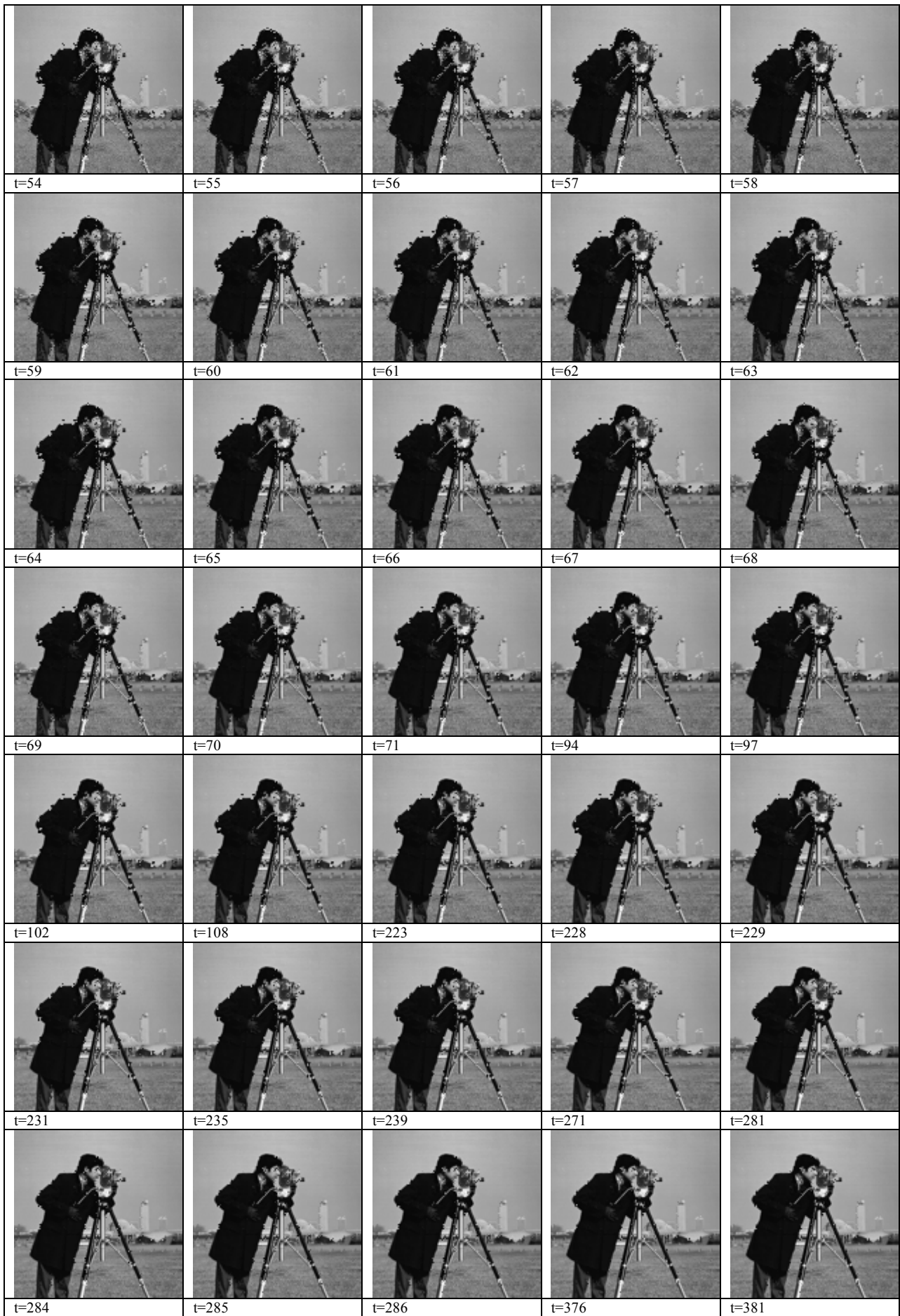




Рис. 4. Результати обробки зображення 'Camergaman' ( $b=8$ ), показано результати ітерацій, при яких мінялося значення цільової функції

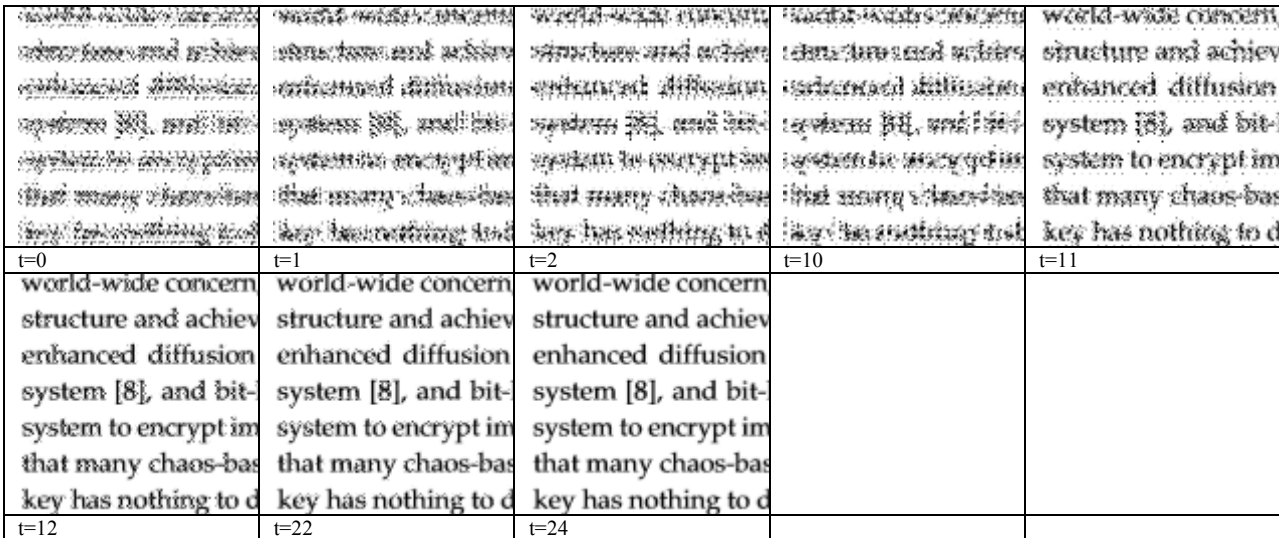


Рис. 5. Результати обробки зображення 'Текст' ( $b=4$ ), показано результати всіх ітерацій, при яких мінялося значення цільової функції

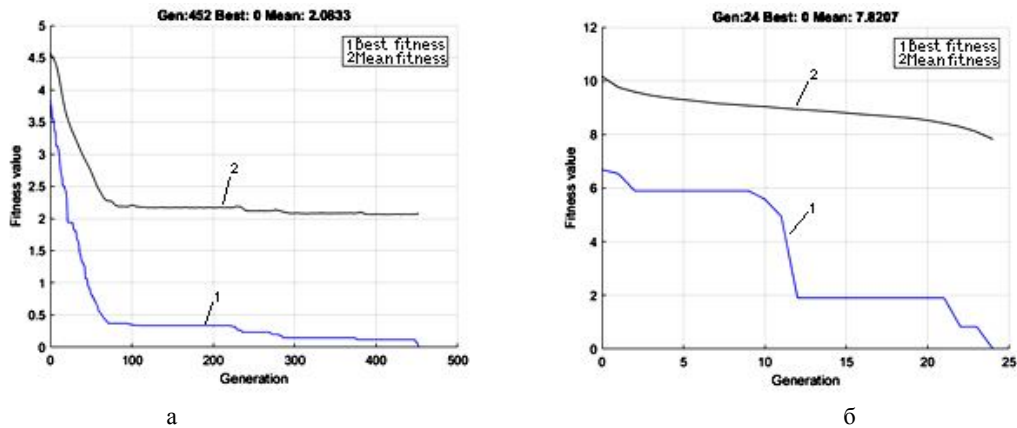


Рис. 6. Графіки зміни цільової функції (найкращого і середнього значення по популяції):  
 а) 'Camergaman' (розмір блоку  $b=8$ ), ГА збігається за 452 ітерації;  
 б) 'Текст' (розмір блоку  $b=4$ ), ГА збігається за 24 ітерації

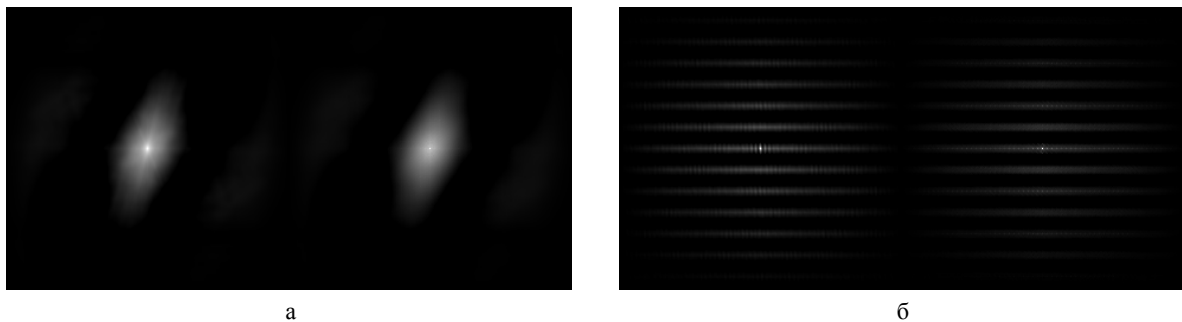


Рис. 7. Зображення автокореляційних функцій для вихідних (зліва) і пермутованих (справа) зображень:  
 а) 'Camergaman' (розмір блоку  $b=8$ ); б) 'Текст' (розмір блоку  $b=4$ )

### Висновки і напрямки подальших досліджень

У роботі показано, що використання генетичних алгоритмів є надзвичайно потужним методом вирішення задачі знаходження інверсних блочних перестановок. Запропоновано ефективний спосіб кодування перестановок в геномі, такий що основні оператори ГА породжували інші допустимі перестановки, які рівномірно покривають область допустимих значень.

Було обрано цільову функцію, мінімізація якої проводиться за допомогою генетичних алгоритмів. Аналізуючи її, було отримано умову принципової

розв'язуваності даної задачі – розмір блоку перестановки повинен бути менше радіусу кореляції вихідного зображення, що добре узгоджується з експериментом. При цьому отримано альтернативне представлення радіусу кореляції зображення, що узгоджується, але не співпадає з традиційним визначенням (через переріз головного піку автокореляційної функції).

Представляються цікавими подальші теоретичні та експериментальні (наприклад, за допомогою спеціально згенерованих синтетичних зображень) дослідження у цьому напрямку, окремого розгляду потребує питання анізотропії і мультимодальності автокореляційної функції.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Skiena, S. The Algorithm Design Manual / Steven S. Skiena // Second Edition. Springer. – 2008.
2. Salleh, M. Image Encryption Algorithm Based on Chaotic Mapping / M. Salleh, S. Ibrahim, I. Fauzi Isninil // Jurnal Teknologi. – 2003.
3. Mitra, A. A new image encryption approach using combinational permutation techniques / A. Mitra, V. Y. SubbaRao, R. S. MahadevaPrasanna // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2006.
4. Rhouma, R. Cryptanalysis of a new image encryption algorithm based on hyper-chaos / R. Rhouma, B. Safya // Physical Letters A. – 2008. – Vol. 372. – P. 5973-5978.
5. Al-Najjar, H. Digital Image Encryption Algorithm Based on a Linear Independence Scheme and the Logistic Map / H. Al-Najjar // International Arab Conference on Information Technology (ACIT 2011). – 2011.
6. Holland, J. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J. Holland // Cambridge, MA: MIT Press. – 1992. – ISBN 978-0262581110.
7. Mitchell, M. An Introduction to Genetic Algorithms / M. Mitchell // Cambridge, MA: MIT Press. – 1996. – ISBN 9780585030944.
8. Banzhaf, W. Genetic Programming – An Introduction / W. Banzhaf, P. Nordin, R. Keller, F. Francone // San Francisco, CA: Morgan Kaufmann. – 1998. – ISBN 978-1558605107.
9. G. Jacob. Genetic Algorithm based Mosaic Image Steganography for Enhanced Security / George, Jacob and Janahanlal Stephen. – 2014.
10. Evolutionary Algorithms for Feature Selection, [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.kdnuggets.com/2017/11/rapidminer-evolutionary-algorithms-feature-selection.html>. звернення 2018-02-19).
11. Dos Santos-Paulino, A. Evolutionary algorithm for dense pixel matching in presence of distortions / A. dos Santos-Paulino, J.-C. Nebel, F. Florez-Revuelta // EvoStar Conference, Granada, Spain. – 23–25 April 2014.
12. Paulinas, Mantas. A survey of genetic algorithms applications for image enhancement and segmentation / Paulinas, Mantas and Usinskas, Andrius // Information Technology and Control. – 2007. – Vol. 36. – P. 278-284.
13. Behzadi, S. Developing a Genetic Algorithm to Solve Shortest Path Problem on a Raster Data Model / S. Behzadi, Ali A. Alesheikh, E. Poorazizi // Journal of Applied Sciences. – 2008. – N. 8. – P. 3289-3293.
14. Cagnoni, Stefano. Genetic and evolutionary computation for image processing and analysis / Cagnoni, Stefano & Lutton, Evelyne & Olague, Gustavo. – 2007.
15. Bruckstein, A.M. Holographic representation of images / A.M. Bruckstein, R.J. Holt, A.N. Netravali // IEEE Transactions on Image Processing. – 1998. – N 7. – P. 1583-1587.
16. Bruckstein, A.M. Holographic image representations: the subsampling method / A.M. Bruckstein, R.J. Holt, A.N. Netravali // IEEE Int. Conference on Image Processing – Santa Barbara, California, USA, October. – 1997. – Vol. 1. – P. 177-180.
17. Bruckstein, A.M. Technique for Holographic Representation of Images / A.M. Bruckstein, R.J. Holt, A.N. Netravali // US 6,091,394. – July 18, 2000. – 6 p.
18. Колесов, В.В. Псевдоголографическое кодирование цифровой информации / В.В. Колесов, Н.Н. Залогин, Г.М. Воронцов // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 2, № 5. – С. 583-588.
19. Марковский, А.В. О квазиголографическом кодировании цифровых изображений / А.В. Марковский // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 9. – С. 163-173.
20. Кузнецов, О.П. Квазиголографический подход к кодированию графической информации / О.П. Кузнецов, А.В. Марковский // Искусственный интеллект. – 2002. – № 2. – С. 474-482.
21. Барина, Д.А. Разработка и исследование алгоритмов обработки цифровых изображений, представленных в псевдоголографических кодах / Д.А. Барина // Компьютерная оптика. – 2005. – № 27. – С. 149-154.
22. Воронин, В.В. Голографическое представление в задачах обработки изображений / В.В. Воронин // Тезисы конференции РОАИ – 5. – 2000. – С. 237-241.
23. Yaloveha V., Hlavcheva D., Podorozhniak A. Usage of convolutional neural network for multispectral image processing applied to the problem of detecting fire hazardous forest areas. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, № 1. С. 116–120. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.19>.
24. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
25. Amin Salih Mohammed, Saravana Balaji B., Hiwa Abdulkarim Mawlood. Conceptual analysis of Iris Recognition Systems. *Advanced Information Systems*. 2019. Vol. 3, No. 2. P. 86-90. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.15>



26. Freeman, H. Apictorial Jigsaw Puzzles: The Computer Solution of a Problem in Pattern Recognition / H. Freeman, L. Garder // IEEE Transactions on Electronic Computers, EC-13(2): – 1964. – P. 118-127.
27. Cho, T. A Probabilistic Image Jigsaw Puzzle Solver / T. Cho, S. Avidan, W. Freeman // Int. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2010. – P. 183-190.
28. Yang, X. Particle Filter with State Permutations for Solving Image Jigsaw Puzzles / X. Yang, N. Adluru, L. J. Latecki // Int. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2011. – P. 2873–2880.
29. Pomeranz, D. A Fully Automated Greedy Square Jigsaw Puzzle Solver / D. Pomeranz, M. Shemesh, and O. Ben-Shahar // In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2011. – P. 9-16.
30. Sholomon, D. A Genetic AlgorithmBased Solver for Very Large Jigsaw Puzzles / D. Sholomon, O. David, N. Netanyahu // Int. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2013. – P. 1767-1774.
31. MATLAB в імplementації функції `randperm`, [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/randstream.randperm.html>. звернення 2018-04-03).
32. Li, X. An efficient two dimensional moving average model for texture analysis and synthesis / X. Li, J.A. Cadzow, D.M. Wilkes, R.A. Peters, M. Bodruzzaman //Publication Year. – 1992. – Vol. 1. –P. 392-395.
33. Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. (ред.). Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009. – 556 с. – ISBN: 978-5-9221-1168-3.
34. MATLAB 9.4.0.813654 (R2018a) з використанням Global Optimization Toolbox Version 3.4.4, [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/404947-using-syms-matlab-stops-working>. звернення 2018-04-19).
35. Adobe Acrobat Reader DC [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.adobe.com/>. звернення 2018-05-10).

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. К. С. Васюта,  
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.  
Received (Надійшла) 21.05.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.07.2019

#### **Использование генетических алгоритмов для нахождения инверсных псевдослучайных блочных перестановок**

А. Н. Маковейчук, И. В. Рубан, Г. В. Худов

**Предметом** изучения в статье является метод нахождения инверсных псевдослучайных блочных перестановок пикселей в изображении. **Целью** является разработка "слепого" метода нахождения инверсных псевдослучайных блочных перестановок с помощью генетических алгоритмов. **Задачи:** провести анализ факторов, влияющих на инверсные псевдослучайные блочные перестановки на изображении, разработать метод кодирования перестановок в генетических алгоритмах, обосновать выбор целевой функции для оптимизации с помощью генетических алгоритмов. Используемыми **методами** являются: методы цифровой обработки изображений, теории вероятности, математической статистики, криптографии и защиты информации, математический аппарат теории матриц. Получены следующие **результаты**. Проведен анализ факторов, влияющих на инверсные псевдослучайные блочные перестановки на изображении. Определены факторы, влияющие на максимальный размер блока, при котором еще возможно нахождение инверсной перестановки. Разработан метод нахождения инверсных псевдослучайных блочных перестановок пикселей в перемутированном изображении с помощью генетических алгоритмов. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем. Установлено, что нахождение инверсных перестановок возможно лишь при условии, что размер блока является меньше радиус корреляции изображения. Предложен эффективный способ кодирования перестановок, при котором стандартные операторы генетических алгоритмов будут порождать новые и только допустимые перестановки. Предложено в качестве целевой функции использовать сумму квадратов градиентов. Показано, что данная целевая функция имеет глобальный минимум для корректной перестановки, которая позволяет находить инверсные блочные перестановки "вслепую" без дополнительной априорной информации.

**Ключевые слова:** генетические алгоритмы, инверсная псевдослучайная блочная перестановка, перемутированное изображение, (псевдо)голографическое кодирования, радиус корреляции.

#### **Using genetic algorithms to find inverse pseudo-random block permutations**

O. Makoviechuk, I. Ruban, G. Hudov

The **subject matter** of the article is a method for finding inverse pseudorandom block permutations of pixels in an image. The **goal** is to develop a "blind" method for finding inverse pseudo-random block permutations using genetic algorithms. **Tasks:** to analyze the factors affecting inverse pseudorandom block permutations in the image, to develop a method for coding permutations in genetic algorithms, to justify the choice of the objective function for optimization using genetic algorithms. The **methods** used are: methods of digital image processing, probability theory, mathematical statistics, cryptography and information protection, the mathematical apparatus of matrix theory. The following **results** are obtained. The analysis of factors affecting inverse pseudorandom block permutations in the image is carried out. The factors affecting the maximum block size at which the inverse permutation is still possible are determined. A method has been developed for finding inverse pseudorandom block permutations of pixels in a permuted image using genetic algorithms. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is as follows. It was established that finding inverse permutations is possible only on condition that the block size is smaller than the image correlation radius. An effective method for coding permutations is proposed, in which the standard operators of genetic algorithms will generate new and only permissible permutations. It is proposed to use the sum of the squared gradients as the objective function. It is shown that this objective function has a global minimum for correct permutation, which allows one to find inverse block permutations "blindly" without additional a priori information.

**Keywords:** genetic algorithms, inverse pseudo-random block permutation, permuted image, (pseudo) holographic coding, correlation radius.

O. Milov, O. Korol, V. Khvostenko

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

## DEVELOPMENT OF THE CLASSIFICATION OF THE CYBER SECURITY AGENTS BOUNDED RATIONALITY

The **subject** are the bounded rationality agents of cyber security system. The **purpose** of this work is to build a classification system for agents of a cybersecurity system with limited rationality. The **tasks**: consideration of the decision-making process by agents in cybersecurity systems, analysis of various manifestations of bounded rationality of agents of the cybersecurity system, introduction of classification features of bounded rationality, formal presentation of bounded rationality of various types, combining agents with various types of bounded rationality into a whole classification system. **Results**. Presents approaches to the classification of the concept of rationality in relation to cybersecurity systems. Such types of rationality are considered as strong, semi-strong, weak. Further classification of types of rationality is carried out on the basis of the place of manifestation of rationality. For this, the decision-making process in the cybersecurity system has been considered, formal relations have been introduced, which characterize its various stages. Such types of bounded rationality as informational, methodological, predictive, evaluative and conditional are considered. The ratio of the considered types of rationality is presented. **Conclusion**: A comparison of various types of bounded rationality, based primarily on its place in the decision-making process, made it possible to propose a classification scheme of bounded rationality characteristic of agents of the cybersecurity system. The result of the formalization of the description of bounded rationality is presented, which can be used as the basis for the development of models of behavior of interacting agents of cybersecurity systems.

**Keywords**: cyber security, decision making process, decision maker, bounded rationality.

### Introduction

In recent years, in the literature on decision-making in cybersecurity systems and the behavior of participants in cyber conflict in particular, it is increasingly said that the behavior of decision-makers (DM) can only be partially characterized as rational. The concept of bounded rationality, originally introduced in [1], is also found in studies on the interaction of participants in teams of cybersecurity systems [2, 3].

Modeling bounded rationality [4] is becoming increasingly relevant due to the increasing interest in shaping and making decisions on ensuring the security of critical infrastructure systems.

The behavior of a decision maker may be far from perfect rationality, either because of its internal motivating factors, or because it is impossible to act rationally due to external factors beyond its control. In the first case, we should speak of intentionally irrational or irrational behavior, which becomes quite rational if we consider it from an alternative position. In modern studies on the so-called "minority games" [5-8], an intentionally irrational strategy of behavior promises the player a much greater gain than the average, which the majority adheres to. The second case of imperfectly rational behavior is more likely associated with objective reasons, it is this option that corresponds to the concept of bounded rationality. The limited rationality is connected, first of all, with the lack of any resources (temporary, material, physical) for the decision maker to make a completely rational decision.

### Research results

To determine possible approaches to modeling, it is necessary first of all to identify the forms of rationality, in particular limited, and to classify them. Consider the options for the classification of rationality,

highlighting the following forms: strong, semi-strong and weak.

A strong form of rationality involves the maximization of utility in one form or another. However, the traditional interpretation of maximization often simplifies the conditions: the role of organizational structures is minimized, the participants in cyber conflict are represented by their utility functions, the distribution of functions between the various participants in the cyber security system is treated as given, and optimization is common. This approach ensures the applicability of formal optimization methods, however, it turns out to be very far from real practice.

A semi-strong form of rationality is limited rationality. This form of rationality suggests that cybersecurity agents tend to act rationally, but in fact they only have this ability to a limited extent. In such a definition, there is both a desire for rationality and its limitations. Modern behavioral sciences recognize that human rationality is limited, and argue that both parts of the definition are essential. The pursuit of rationality means a focus on the economical use of limited resources, and the recognition of limited cognitive abilities serves as an incentive to explore the functioning of cybersecurity systems in general. If the assumption of bounded rationality is made, then making decisions that fully cover all possible cases is a non-realistic assumption in the study of security systems. On the other hand, if intelligence is a limited resource, then the desire to save on its use is quite understandable. There are two ways to save on intelligence in the framework of the bounded rationality model: firstly, during the decision-making processes themselves, and secondly, using the help of governing structures. In this case, it is necessary to distinguish between situations of choice in terms of limited information (uncertainty or low probability of

events) and situations in which the decision maker does not have an idea of the full set of possible states of choice when we are dealing with limited cognitive activity in one form or another.

Finally, organic rationality is the weakest form. This is the rationality of some process occurring in the cybersecurity system. At the same time, within the framework of the evolutionary approach, it considers the rationality of the whole process from the point of view of the goals of the system, which to some extent resembles the well-known thesis “the goal justifies the means”.

Obviously, this classification should be supplemented with two other forms of behavior: irrational and irrational. However, the decision on whether behavior can be attributed to these two types substantially depends on what is known about the decision makers' motivations, its goals and its consistency with each other and the goals of the cybersecurity system as a whole.

The above classification exhaustively exhausts the possible types of rationality, however, the concept of bounded rationality should be considered in more detail.

Since rationality is ultimately realized by the adoption of a decision, then the classification should be associated with the decision-making process. External constraints affecting the rationality of the choice of decision makers can manifest themselves at different stages of the decision-making process and in various ways. Therefore, the place of occurrence of limited rationality in the decision-making process can be considered as the basis of classification.

Consider the basic model of the decision-making process (Fig. 1).

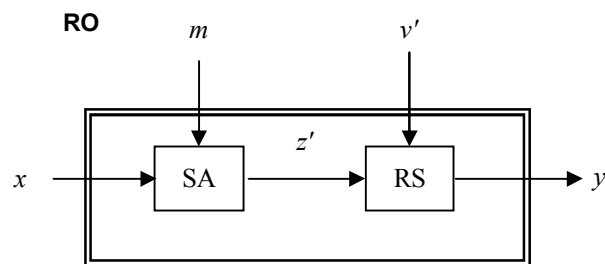


Fig. 1. The basic model of the decision-making process

The decision maker receives input information  $x$  from its environment and uses it at the situation assessment (SA) stage to determine the specific value of the variable  $z$ , which indicates the situation. Information from the rest of the safety management team (RO) -  $m$  - may change the assessment of the situation and result in a different value from the previously accepted value for  $z'$ . Possible alternatives for action will be evaluated at the stage of selecting an answer (RS). The result of this process is the choice of action or response decision  $y$ . The control input  $v'$  from the rest of the organization (external environment) can influence the selection process.

At the stage of obtaining input information from the environment, the limited resources of decision

makers lead to a lack of information about the external environment and the situation of the confrontation as a whole. This option should be distinguished from decision making under conditions of uncertainty, which arose due to the fundamental impossibility of obtaining complete information, for example, because of the presence of stochastic elements in the decision making problem. The rationality of decision-makers may be limited at this stage also because the information coming to it depends on other persons in whose interests to hide or distort complete information about the state of the external environment and the situation. In this case, we can talk about decision-making in conflict situations, where the limitation of decision makers is manifested in the form of insufficient data on reliable and complete information.

In contrast to the previous case, there is no fundamental impossibility of obtaining information; however, obtaining it may require a significant investment of time and resources. It can be assumed that with sufficient time and material resources, the decision makers would conduct a thorough research (exploration) and receive additional information. Therefore, this situation can be characterized as information limited rationality.

At the stage of assessing the situation (SA), one of the following problems may arise before the DM: the lack of assessment methods for this class of situations, the absence or lack of algorithms that implement assessment methods, incompleteness of information for applying certain algorithms, computational complexity of assessment algorithms, and .P. The problem of incomplete information returns us to the previous stage of decision making.

The most significant from the point of view of bounded rationality is the absence of methods and algorithms for evaluation. This problem becomes even more complicated than the more specific is the decision-making task, which may be characteristic of hybrid threats. It is characteristic of single (single) choice tasks in which the decision maker deals with a new threat. The limited rationality of the decision maker may lead to the choice of an inadequate method of assessing the situation or obtaining an unreliable assessment of  $z$ . Thus, at the stage of assessing the situation, we are dealing with methodological and estimated limitations of rationality.

At the next stage of evaluating possible alternative actions, lack of resources leads to two options for limitation: the limited number of alternatives and the limited knowledge of the consequences of choice. The limited rationality associated with a multitude of alternatives is manifested in the fact that the decision maker may in principle be unaware of the existence of such an alternative, or exclude from consideration those alternatives that seem to him impracticable or for studying which will have to spend too many resources. The limitedness of alternatives returns us to the first stage of informational limitation, since it speaks of the insufficient study of the situation. But limited knowledge about the consequences is an independent option, because besides the lack of information it can

also be associated with limited possibilities of forecasting certain elements of the situation, both for objective reasons and because of targeted actions by RO elements (for example, in the face of conflicts of interests of various LPR). So, at this stage predictive limited rationality arises.

Finally, at the last stage of decision making - the stage of choosing the option of action  $y$  - limited rationality can be associated with the lack of a method of choice, that is takes the form of a methodological, or appears as a modification of the original decision-making task by introducing additional constraints, i.e. conditional. From this point of view, it seems useful to us to use the classification proposed in [9].

Let the interests of the decision maker reflect its objective function  $f(y)$ , defined on a set of possible actions:  $y \in A, f: A \rightarrow \mathbb{R}^1$ . Then the set of rational choice will be a set of actions that deliver the maximum of the objective function:

$$P^0(f(\cdot), A) = \left\{ \text{Arg max}_{y \in A} f(y) \right\}. \quad (1)$$

Principle (1) corresponds to rationality in a strong form. Models of bounded rationality imply the abandonment of the aim of the decision maker to achieve the absolute maximum, replacing it with the assumption of striving to achieve a certain level of utility, perhaps, depending on the magnitude of the optimum.

So far, we have not imposed any specific restrictions on the aims of the decision maker and their presentation. However, this becomes necessary when building a formal description. We introduce the following assumption about the objective function and the admissible set: let  $f()$  be continuous and concave, and the set  $A$  be convex and compact. Within the framework of these assumptions, the set  $P^0(f(), A)$  is non-empty.

$$\text{Let } y^* = \arg \max_{y \in A} f(y).$$

For simplicity, we assume that  $f(y^*) \geq 0$ .

Three types of bounded rationality, corresponding to the decision-making stage, describe possible easing of the maximization requirements.

Minimum sufficient solution. Suppose that the decision maker seeks to provide some minimum level

of individual utility  $U$ , that is, a set of rational choice can be considered

$$P^1(f(\cdot), A, \bar{U}) = \{y \in A / f(y) \geq \bar{U}\}. \quad (2)$$

Rational absolute losses. Suppose that the agent is ready to accept the loss of a fixed value  $\varepsilon \geq 0$  compared with the absolute maximum. Then the rational choice set is

$$P^2(f(\cdot), A, \varepsilon) = \{y \in A / f(y) \geq f(y^*) - \varepsilon\}. \quad (3)$$

Note that this method of taking into account the "insensitivity" and thresholds for distinguishing is most common in game-theoretic models and, when used in the construction of generalized solutions, makes it possible to achieve stability of the solution by the model parameters. In addition, this type of presentation of rational behavior is consistent with models that take into account uncertainty, including the uncertainty of the goals of decision makers.

Rational relative loss. Suppose that the decision maker is ready to accept the losses that are no more than a fixed part  $\delta \in (0, 1]$  of the maximum possible result for him. Thus, the set of rational choice depends on the optimal value:

$$P^3(f(\cdot), A, \delta) = \{y \in A / f(y) \geq (1 - \delta)f(y^*)\} \quad (4)$$

or equivalent

$$P^3(f(\cdot), A, \delta) = \{y \in A / f(y^*) - f(y) \leq \delta f(y^*)\}. \quad (5)$$

The introduced three types of bounded rationality cover most of the tasks encountered in practice and can be used in the case of multicriteria decision-making problems.

Note that the optimization of absolute and relative losses is associated with finding the optimal solutions, and the possibilities of this search are limited due to the limitation of decision makers in the previous stages of the decision-making process. Therefore, this classification can only be considered an integral part of the more general one considered earlier.

Constructed version of the classification of bounded rationality should be presented in the form of a diagram (Fig. 2), which shows the types of bounded rationality relating to the various stages of the decision-making process.

Stages of the decision process	Types of bounded rationality				
	informational	methodological	estimated	forecast	conditional
Receiving the information					
Assessment of the situation					
Evaluation of alternatives					
Decision making					

Fig. 2. Classification of bounded rationality

The proposed classification makes it possible to formalize the concept of bounded rationality as follows.

Let us denote by  $x^D$  information about the situation accessible by the decision maker. This information may be complete and relevant to the actual

state of affairs, in this case  $x^D = x$ , where  $x$  is complete and reliable information about the decision-making situation. If the information is incomplete, but all its components are reliable, then we get:  $x^D \subset x$ , and, finally, the presence of unreliable information leads to the case  $x^D - x \neq \emptyset$ . The latter option is most fraught

with the adoption of not just irrational, but obviously wrong decision. Thus, informational bounded rationality can have three degrees: absence or unboundedness, partial boundedness, and fundamental boundedness. The same degrees can be distinguished in all other types of bounded rationality.

In the future, we will mark with an index  $D$  the components of the decision-making process related to DM.

At the stage of assessing the situation in terms of the methodological and evaluative limited rationality of the decision maker, only a fraction of the entire set of adequate algorithms for assessing the situation  $\{SA\}$  is available  $\{SA^D\}$ , i.e.

$$\{SA^D\} \subseteq \{SA\}. \quad (6)$$

The application of a full set of assessment algorithms to the information available to the decision maker gives an assessment, generally speaking, different from that which can be obtained on the basis of complete information, and even more different from the one that the decision maker will receive, operating with its own set of algorithms:

$$\begin{aligned} z &= SA(x), \\ z^a &= SA(x^D), \\ z^D &= SA^D(x^D), \\ z &\geq z^a, \quad z^a \geq z^D, \quad z \geq z^D. \end{aligned} \quad (7)$$

It is obvious that in this sequence the assessment corresponding to absolute rationality (optimality) may differ significantly from that used by the decision maker.

If the process of assessing the situation is also affected by the rest of the team, then the result will undergo certain changes and, therefore, we will

$$\begin{aligned} z' &= SA(x, m), \quad z'^D = SA^D(x^D, m), \\ z' &\geq z'^D, \quad z'^D \geq z^D, \end{aligned} \quad (8)$$

where  $m$  – information from the external environment,  $z'$  – assessment of the situation, taking into account external influence based on complete information,

$z'^D$  – the same for evaluating decision makers. Next, the decision maker acts on the basis of this assessment.

Further, let  $\{RS\}$  – the whole set of methods and algorithms for choosing a solution adequate to this task of choosing a solution  $\{RS^D\}$  is the set of available decision makers due to the informational, methodological and predictive boundedness of algorithms and methods for choosing a solution, while

$$\{RS^D\} \subseteq \{RS\}. \quad (9)$$

The final choice of the solution -  $y$ , made in the framework of a rational campaign and in conditions of independence, is the result of transformations:

$$y = RS(z) = RS(SA(x)). \quad (10)$$

Assuming that the selection process itself is also influenced by the external environment in the form of information  $v'$ , then the result will be different

$$y' = RS(z', v') = RS(SA(x, m), v'). \quad (11)$$

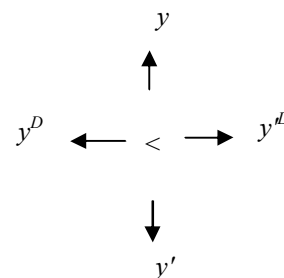
As for the choice made by the decision maker, its result is

$$y^D = RS^D(z^D) = RS^D(SA^D(x^D)) \quad (12)$$

in conditions of independence, or, in the presence of external influence

$$y'^D = RS^D(z'^D, v') = RS^D(SA^D(x^D, m), v'). \quad (13)$$

The relationship between these choices is the same as for the situation assessments (7), which can be represented by the scheme:



Thus, considering any pair of choices, we obtain an inequality, the specific form of which depends on the conditions of choice.

Combining all of the above, we can present the effect of bounded rationality in the form of the following diagram (Fig. 3).

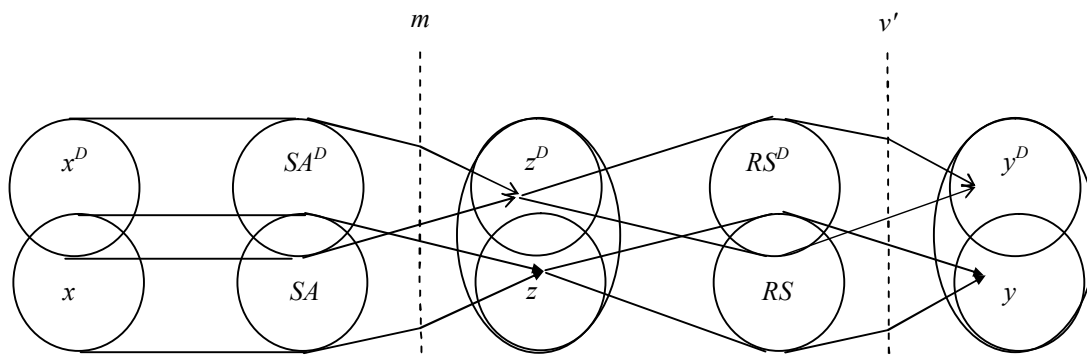


Fig. 3. The ratio of unlimited and limited rationality in decision making

The scheme can be used to build mathematical and simulational decision-making models in conditions of bounded rationality.

### Conclusion

A comparison of various types of bounded rationality, based primarily on its place in the decision-

making process, made it possible to propose a classification scheme of bounded rationality characteristic of agents of the cybersecurity system. The result of the formalization of the description of bounded rationality is presented, which can be used as the basis for the development of models of behavior of interacting agents of cybersecurity systems.

### REFERENCES

1. Herbert A. Simon (1955) / A Behavioral Model of Rational Choice // The Quarterly Journal of Economics, Vol. 69, No. 1 (Feb., 1955), pp. 99-118
2. Lempert, R. (2002). Agent-based modeling as organizational and public policy simulators. Proceedings of the National Academy of Sciences 99(3): 7195–7196.
3. Tuomas W Sandholm and Victor R Lesser (1995). Coalition formation among bounded rational agents. Technical report, University of Massachusetts at Amherst Computer Science Department, 1995.
4. Rubinstein, Ariel, Modeling Bounded Rationality (Cambridge, MA: MIT Press, 1998).
5. Gabaix, Xavier, “Some Game Theory with Sparsity-Based Bounded Rationality,” Working Paper, New York University, 2013.
6. Amin Salih M., Yuvaraj D., Sivaram M., Porkodi V. Detection And Removal Of Black Hole Attack In Mobile Ad Hoc Networks Using Grp Protocol. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. Vol. 9, No 6. P. 1–6, DOI: <http://dx.doi.org/10.26483/ijarcs.v9i6.6335>
7. Saravanan S., Hailu M., Gouse G.M., Lavanya M., Vijaysai R. Optimized Secure Scan Flip Flop to Thwart Side Channel Attack in Crypto-Chip. *International Conference on Advances of Science and Technology, ICAST 2018*. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Vol 274. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15357-1\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15357-1_34)
8. Manikandan V, Porkodi V, Mohammed AS, Sivaram M, “Privacy Preserving Data Mining Using Threshold Based Fuzzy cmeans Clustering”, ICTACT Journal on Soft Computing, Volume 9, Issue 1, 2018, pp.1813-1816. DOI: [10.21917/ijsc.2018.0252](https://doi.org/10.21917/ijsc.2018.0252)
9. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. М.: ИПУ РАН, 2003. – 102 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,  
Національний технічний університет “ХПІ”, Харків  
Received (Надійшла) 17.06.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.07.2019

### Розробка класифікації агентів кібербезпеки з обмеженою раціональністю

О. В. Мілов, О. Г. Король, В. С. Хвостенко

**Предметом** є класифікація агентів з обмеженою раціональністю системи кібербезпеки. **Метою** роботи є побудова системи класифікації агентів системи кібербезпеки з обмеженою раціональністю. **Задачі:** розгляд процесу прийняття рішень агентами в системах кібербезпеки, аналіз різних проявів обмеженої раціональності агентами системи кібербезпеки, введення класифікаційних ознак обмеженої раціональності, формальне подання обмеженої раціональності різних типів, об'єднання агентів з різним типом обмеженої раціональності в єдину систему класифікації. **Висновок.** Порівняння різних типів обмеженої раціональності, заснованої, перш за все, на її місці в процесі прийняття рішень, дозволило запропонувати класифікаційну схему обмеженої раціональності, характерну для агентів системи кібербезпеки. Представлений результат формалізації опису обмеженої раціональності можна використовувати в якості основи для розробки моделей поведінки взаємодіючих агентів систем кібербезпеки.

**Ключові слова:** кібербезпека, процес прийняття рішень, ОПР, обмежена раціональність.

### Разработка классификации агентов кибербезопасности с ограниченной рациональностью

А. В. Милов, О. Г. Король, В. С. Хвостенко

**Предметом** является классификация агентов с ограниченной рациональностью системы кибербезопасности. **Целью** работы является построение системы классификации агентов системы кибербезопасности с ограниченной рациональностью. **Задачи:** рассмотрение процесса принятия решений агентами в системах кибербезопасности, анализ различных проявлений ограниченной рациональности агентов системы кибербезопасности, введение классификационных признаков ограниченной рациональности, формальное представление ограниченной рациональности различных типов, объединение агентов с различным типом ограниченной рациональности в единую систему классификации. **Заключение.** Сравнение различных типов ограниченной рациональности, основанной, прежде всего, на ее месте в процессе принятия решений, позволило предложить классификационную схему ограниченной рациональности, характерную для агентов системы кибербезопасности. Представлен результат формализации описания ограниченной рациональности, который можно использовать в качестве основы для разработки моделей поведения взаимодействующих агентов систем кибербезопасности.

**Ключевые слова:** кибербезопасность, процесс принятия решений, ЛПП, ограниченная рациональность.

O. Morozova

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine

## BASICS FOR THE FORMALIZATION OF EDUCATIONAL AND PRODUCTION PROCESSES

The article deals with the basics for the formalization of educational and production processes. The development of instrumental means for formal representations for unified approach at the creation of the special mathematical support of IT-solutions in systems with educational and production processes is the goal of creation of educational and production processes formalization technology. Application of the mathematical apparatus, which brings the research to the higher level of these processes abstraction, is a distinctive feature of the processes formalization in the systems under research, as well as their connections and interrelations. The topological variations bring the research to the new, more abstract formalization level. The formal representations of the theory of sets are a case of topological variation. Local to global transfer is one of the most important conditions for variety. The examples of the general education institutions and higher education institutions relations and the higher education institutions and production relations were shown. The integration processes between the educational and production systems in the form of different algebraic systems was given. They include a set or models, and a collection of operations, that is, the signature of algebra. The procedure of formal description of adjacent nucleus models was described. The work contains the logical methods of knowledge representation, which allow us to move to heuristic representations of knowledge, namely production rules, semantic networks, frame systems, as well as ontological structures.

**Keywords:** education systems, production systems, formalization technology, topological variation, nucleus in topological spaces.

### Introduction

The research of systems with educational and production processes is a complex task, which is complicated by poorly structured processes and their phenomena, as well as by the variety of their structures, forms, methods, techniques, specific content, etc. [1–4]. The experience has shown that it is the diversity of processes and phenomena that challenge the creation of appropriate models and their implementation.

The development of instrumental means for formal representations for unified approach at the creation of the special mathematical support of IT-solutions in systems with educational and production processes is the goal of creation of educational and production processes formalization technology.

Application of the mathematical apparatus, which brings the research to the higher level of these processes abstraction, is a distinctive feature of the processes formalization in the systems under research, as well as their connections and interrelations. The topological variations bring the research to the new, more abstract formalization level. It is known, that the formal representations of the theory of sets are a case of topological variation.

Let us ground the opportunity of presenting the systems with educational and production processes as a variety.

Local to global transfer is one of the most important conditions for variety. The first step in proving the possibility of using the notion of diversity is to introduce parameterization, that is, the "state of space" of systems with educational and production processes. This enables the description of each state of the systems under research with a set of numbers. As an example, one can give a set of numbers, which characterize the state of educational systems of 3-4 accreditation level at licensing thereof.

The formal representations of such numbers are given in the paper [5], and the availability of attractors' creation, that is – alteration of the educational system states in time, is mapped by a strange attractor [6–12]. The production systems are also characterized by the state of space and availability of their state alteration with proper attractors.

### 1. Formalization with varieties

Let us write the variety of processes and phenomena between the educational systems of 1-2 and 3-4

accreditation level as  $\mathfrak{D}^f \left( \begin{matrix} 1,2 \leftrightarrow 3,4 \end{matrix} \right)$ , and the variety between the educational systems of 3-4 accreditation level

and the production systems as  $\mathfrak{D}^f \left( \begin{matrix} 3,4 \leftrightarrow P \end{matrix} \right)$ :

$$\left\{ \begin{matrix} \mathfrak{D}^f \left( \begin{matrix} 1,2 \leftrightarrow 3,4 \end{matrix} \right) \rightarrow \mathbb{R}^n \rightarrow \Pi^{\triangleleft} \rightarrow \{\bar{F}, \bar{K}\}; \\ \mathfrak{D}^f \left( \begin{matrix} 1,2 \leftrightarrow 3,4 \end{matrix} \right) \supset (\mathbb{R}^n \supset (\Pi^{\triangleleft} \supset \{\bar{F}, \bar{K}\})). \end{matrix} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{matrix} \mathfrak{D}^f \left( \begin{matrix} 3,4 \leftrightarrow P \end{matrix} \right) \rightarrow \mathbb{R}^n \rightarrow \Pi^{\triangleleft} \rightarrow \{\bar{F}, \bar{K}\}; \\ \mathfrak{D}^f \left( \begin{matrix} 3,4 \leftrightarrow P \end{matrix} \right) \supset (\mathbb{R}^n \supset (\Pi^{\triangleleft} \supset \{\bar{F}, \bar{K}\})). \end{matrix} \right. \quad (2)$$

The examples of interpreting the general education institutions and higher education institutions as well as interpreting the higher education institutions and production relations are given in Figures 1 and 2 correspondingly.

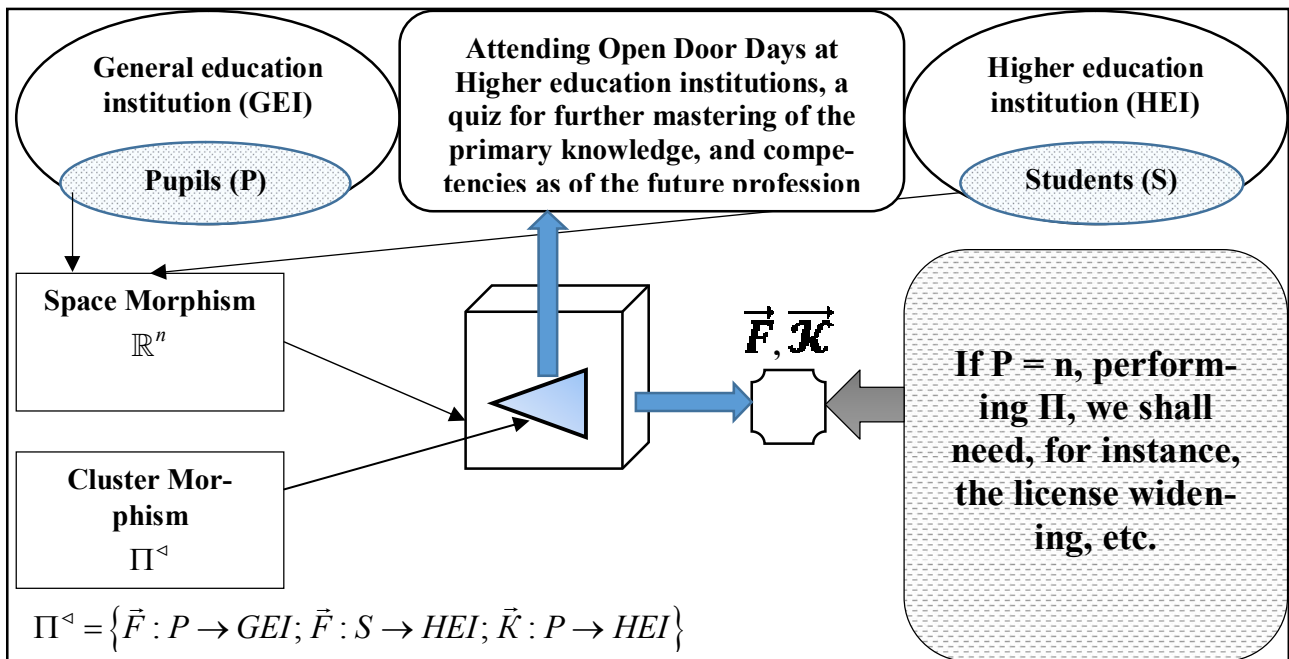


Fig. 1. The general education institutions and higher education institutions relations

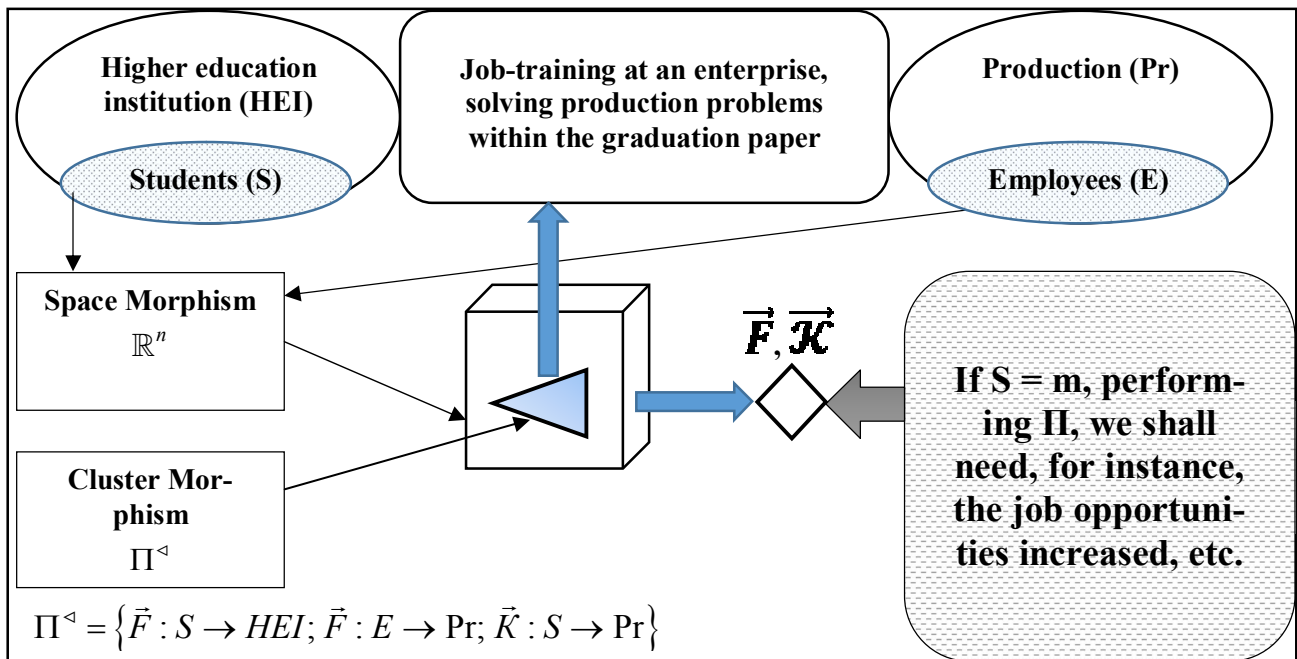


Fig. 2. The higher education institutions and production relations

Let us give the integration processes between the educational and production systems in the form of different algebraic systems. They include a set or models, and a collection of operations, that is, the signature of algebra. The essence of the integration of applied IT in the systems with educational and production processes is given in Fig. 3. The Integration is based on IT under DSTU 2481-94 [13], etc.

The next paragraph of this work includes a formal description of adjacent nucleus models in topological space [14–16], based on the algebra of sets.

This way, the paper gives the basics of processes and phenomena formalization in the educational and production environment based on the highly abstractive topological varieties.

## 2. Formal description of adjacent nucleus models

The adjacent nucleus models were formally described based on known as formalized theories, where the indicated formalism is the set of three

$$T_{\mathcal{R}\mathcal{S}} = \langle \Sigma_{\mathcal{R}}, S_{LA}, L \rangle, \quad (3)$$

where  $\Sigma_{\mathcal{R}}$  – is a set of adjacent nucleus models of topologic space, the symbols of which make the properly constructed formulas;

$S_{LA}$  – is a system of logical axioms, resulted from transition from illogical axioms to logical ones, based on Boolean algebra;



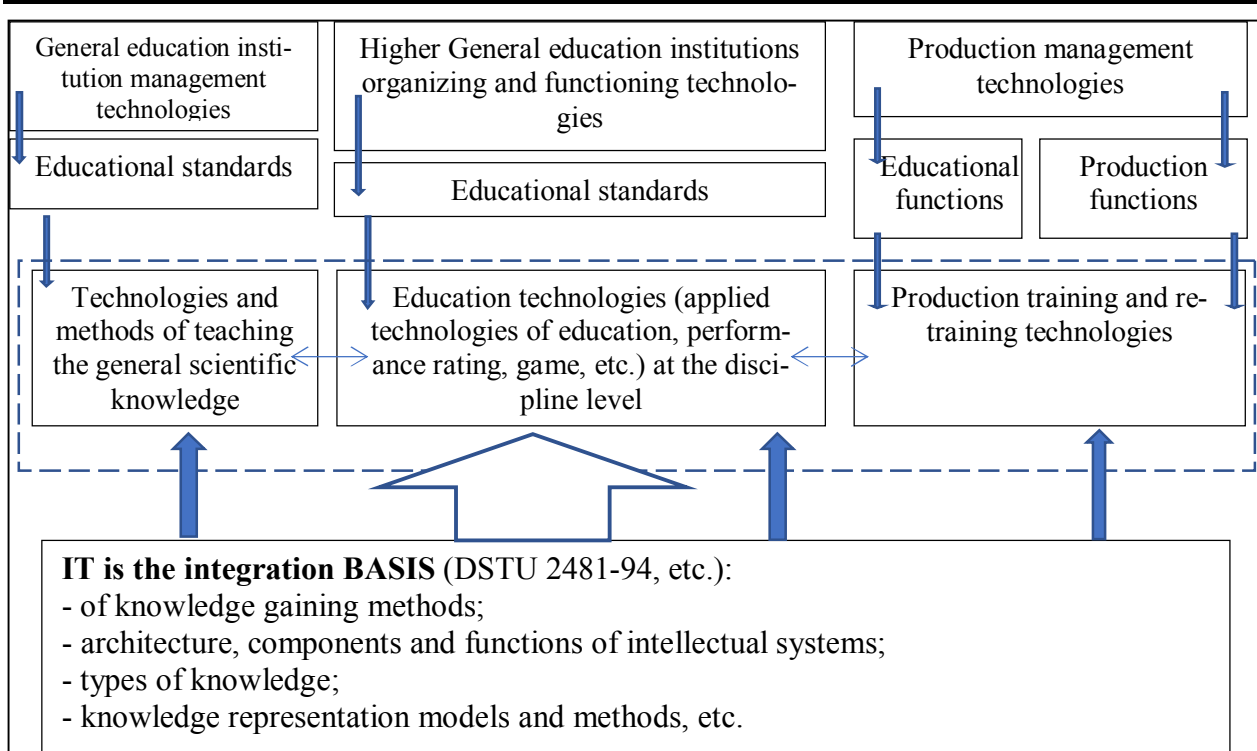


Fig. 3. Integration of the applied IT to the systems with educational and production processes

L – is a rule of logical interference, the generalized form of which is given below

$$\frac{F_1, F_2, \dots, F_n}{G}$$

where  $F_1, F_2, \dots, F_n$  – is the hypothesis of rule, G – is the consequence thereof.

The high-level abstraction logic models reflect the interaction of the learning complexes. For example, the selection of graduates for employment by an employer, or employees training plan creation processes.

For general educational institutions, the interaction of students with the corresponding electronic classes "a geography classroom", "a mathematics classroom", a quiz, integration of the support system of educational processes with school sites can be used as an example. A model based on the subject area of "Organization and functioning of a higher education institution" thesaurus [17] can be used as an example of a domain model.

Curriculum models can be used as examples of declarative or procedural knowledge.

The work contains the logical methods of knowledge representation, which allow us to move to heuristic representations of knowledge, namely production rules, semantic networks, frame systems, as well as ontological structures.

### Conclusions

The paper contains the principles of processes and phenomena formalization in the educational and production environment based on the highly abstractive topological varieties.

The proposed formalization bases of educational and production processes that provide integration of education and production systems will enable a graduate to faster adapt to the production tasks and to increase the number of product innovations.

### REFERENCES

1. Метешкин К. А. (2004). Кибернетическая педагогика: теоретические основы управления образованием на базе интегрированного интеллекта : монография. Харьков : Международ. Славян. ун-т, 400 с.
2. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 117–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>.
3. Merlac V. Resources Distribution Method of University e-learning on the Hyperconvergent platform / V. Merlac, S. Smatkov, N. Kuchuk // Conf. Proc. of 2018 IEEE 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Dependable Systems, Service and Technologies. DESSERT'2018. Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2018. – P. 136-140. – URL : <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409114>
4. Kuchuk N. Method for calculating of R-learning traffic peakedness / N. Kuchuk; O. Mozhaiev, M. Mozhaiev; H. Kuchuk // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017. – 2017. – P. 359 – 362. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>
5. Метешкин К. А. (2010). Основы организации, функционирования и перспективы развития системы «высшая школа Украины» : монография. Харьков : ХНАГХ, 309 с.
6. Strange attractor [Electronic resource]. URL: [https://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Strange\\_attractor](https://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Strange_attractor) (11.03.2019).
7. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)

8. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), "Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study", Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
9. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
10. Kuchuk G., Nechausov S., Kharchenko, V. Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store. *International Conference on Information and Digital Technologies. Zilina*, 2015. P. 266-271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982>
11. Ruban, I. Redistribution of base stations load in mobile communication networks / I. Ruban, H. Kuchuk, A. Kovalenko // Innovative technologies and scientific solutions for industries. – 2017. – No 1 (1)– P. 75-81. – DOI : <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075>
12. Морозова О. И. (2017) Топологические многообразия в системах обучения, образования и производства. Экспертные оценки элементов учебного процесса : XIX межвуз. науч.-практ. конф., 25 нояб. 2017 г. Харьков, С. 82–84.
13. Державний стандарт України. Системи оброблення інформації. Інтелектуальні інформаційні технології. Терміни та визначення. ДСТУ 2481-94 (1994). К. : Держстандарт України, 72 с.
14. Pervin W. J. (1964). Foundations of general topology. *New York : Academic Press*, 222 p.
15. Введение в топологию : учеб. пособие / Ю. Г. Борисович, Н. М. Близняков, Я. А. Израилевич, Т. Н. Фоменко (1995). М. : Наука : Физматлит, 416 с.
16. Dixmier J. (2013) General topology. [Berlin] : Springer Science & Business Media, 141 p.
17. Морозова О. И. (2019) Модель формування процесів, що протікають в освітніх та виробничих системах, заснована на використанні онтологічного інжинірингу. Системи управління, навігації та зв'язку, № 2 (54), Полтава, С. 135–138.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,  
 Національний технічний університет «ХПІ», Харків  
 Received (Надійшла) 06.06.2019  
 Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

### Основи формалізації освітніх та виробничих процесів

О. І. Морозова

В роботі наведено основи формалізації освітніх та виробничих процесів. Метою створення технології формалізації освітніх і виробничих процесів є розробка інструментальних засобів формальних уявлень, що забезпечують єдиний підхід при побудові спеціального математичного забезпечення інформаційно-технологічних рішень в системах з освітніми та виробничими процесами. Відмінною особливістю формалізації процесів, що протікають в досліджуваних системах, а також зв'язків і відносин між ними є використання математичного апарату, який виводить дослідження на більш високий рівень абстрагування цих процесів. Використання топологічних різноманіть виводить дослідження на новий більш абстрактний рівень формалізації. Формальні уявлення теорії множин є окремим випадком топологічного різноманіття. Однією з найважливіших умов існування різноманіття є перехід від локального до глобального. Наведено приклади інтерпретації відношень загальноосвітніх закладів та закладів вищої освіти, а також інтерпретації відношень закладів вищої освіти та виробництва. Процеси інтеграції між освітніми і виробничими системами представлено у вигляді різних алгебраїчних систем. Вони складаються з деякої множини або моделей, і набором операцій над ними, тобто сигнатурою алгебри. Показано процедуру формального опису моделей суміжних ядер. Розглянуті у роботі логічні методи представлення знань дозволяють перейти до евристичних представлення знань, а саме продукційними правилами, семантичними мережами, фреймових системами, а також онтологічними конструкціями.

**Ключові слова:** освітні системи, виробничі системи, технологія формалізації, топологічні різноманіття, ядра топологічних просторів.

### Основы формализации образовательных и производственных процессов

О. И. Морозова

В работе приведены основы формализации образовательных и производственных процессов. Целью создания технологии формализации образовательных и производственных процессов является разработка инструментальных средств формальных представлений, обеспечивающих единый подход при построении специального математического обеспечения информационно-технологических решений в системах с образовательными и производственными процессами. Отличительной особенностью формализации процессов, протекающих в исследуемых системах, а также связей и отношений между ними является использование математического аппарата, который выводит исследование на более высокий уровень абстрагирования этих процессов. Использование топологических многообразий выводит исследование на новый более абстрактный уровень формализации. Формальные представления теории множеств являются частным случаем топологического многообразия. Одним из важнейших условий существования многообразия является переход от локального до глобального. Приведены примеры интерпретации отношений общеобразовательных учреждений и высших учебных заведений, а также интерпретации отношений высших учебных заведений и производства. Процессы интеграции между образовательными и производственными системами представлены в виде различных алгебраических систем. Они состоят из некоторого множества или моделей, и набором операций над ними, то есть сигнатурой алгебры. Показано процедуру формального описания моделей смежных ядер. Рассмотренные в работе логические методы представления знаний позволяют перейти к эвристическому представлению знаний, а именно продукционными правилами, семантическими сетями, фреймовыми системами, а также онтологическими конструкциями.

**Ключевые слова:** образовательные системы, производственные системы, технология формализации, топологические многообразия, ядра топологических пространств.

О. М. Паценко

Національний науковий центр «Інститут метрології», Харків, Україна

## ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ МЕТОДОМ БРІНЕЛЛЯ

**Метою статті** є розробка процедури оцінювання невизначеності вимірювань твердості металів методом Брінелля. **Результати.** Проаналізовано основні методи вимірювання твердості. Розглянуто особливості вимірювання твердості металів методом Брінелля та наведені основні джерела невизначеності. Розроблена процедура оцінювання невизначеності вимірювань твердості металів методом Брінелля та наведений приклад оцінювання невизначеності. Проведена валідація розробленої процедури методом Монте-Карло.

**Ключові слова:** твердість метала, метод Брінелля, невизначеність вимірювань, бюджет невизначеності, метод Монте-Карло.

### Вступ

Вимірювання твердості є найпоширеніші з усіх механічних випробувань, як при дослідженнях, так і при контролі якості продукції в виробничих умовах. Знаючи твердість можна швидко знайти межу міцності і текучості матеріалу, що дуже важливо для прикладних інженерних задач [1].

Механічні властивості зумовлюють поведінку виробу під впливом зовнішніх навантажень, які можуть значно змінюватися залежно від умов експлуатації.

Використання методів механічних випробувань на твердість дозволяє:

- випробувати малі об'єми металу;
- проводити механічні випробування, коли інші способи використати неможливо;
- випробувати матеріали без руйнування;
- використовувати зразки з попередньою обробкою малої ділянки поверхні матеріалу;
- визначити твердість окремих структурних складових або окремих шарів матеріалу;
- вимірювати твердість безпосередньо на працюючому устаткуванні;
- встановлювати аналітичний зв'язок з даними інших випробувань.

Для визначення твердості використовуються статичні та динамічні методи [2]. Найбільш поширеними є статичні методи, при яких навантаження на індентор прикладають плавно й повільно, час витримування під навантаженням регламентується стандартами на методи проведення випробувань, тому вони є найбільш точними. До статичних методів відносяться методи Брінелля, Роквелла та Віккерса [3].

На підприємствах найбільш широко використовується метод Брінелля, оскільки він не потребує ідеальної чистоти поверхні, та знаючи твердість по Брінеллю можна швидко знайти межу міцності та текучості матеріалу, що дуже важливо для прикладних інженерних задач [4].

Вимірювання твердості здійснюється в випробувальних лабораторіях, які є акредитованими на виконання вимог стандарту ISO/IEC 17025:2017 [5]. Цей стандарт законодавчо закріпив необхідність наявності процедур оцінювання невизначеності

вимірювань (НВ), які були проведені в акредитованих лабораторіях.

**Метою цієї статті** є розробка процедури оцінювання невизначеності вимірювань твердості металів методом Брінелля.

### Аналіз процедури вимірювань твердості та основних джерел невизначеності вимірювань

При визначенні твердості за методом Брінелля сталевий кулька діаметром ( $D$ ) вдавлюється у випробуваний зразок під дією навантаження ( $P$ ), прикладеного на період визначеного часу (рис. 1).

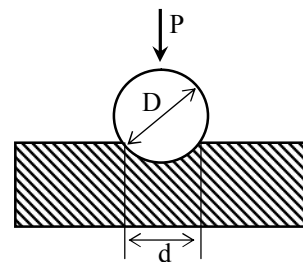


Рис. 1. Схема методу Брінелля

Число твердості по Брінеллю НВ дорівнює відношенню навантаження  $P$  (Н) до площі кулькової поверхні відтиску  $S$  (мм<sup>2</sup>) і розраховують за формулою:

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{2P}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (1)$$

де  $D$  – діаметр кульки, мм;  $d$  – діаметр відтиску, мм.

Діаметр відтиску визначається за допомогою вимірювального мікроскопа в сотих долях міліметра як середнє арифметичне з двох вимірювань взаємно перпендикулярних діаметрів.

Для підвищення точності вимірювання твердості експеримент повторюють багаторазово з оцінюванням середнього арифметичного значень твердості.

Параметри, які є джерелами невизначеності при вимірюванні твердості, наведені в табл. 1 і розділені на групи відповідно до їх походження: випробуваний зразок; твердомір; доквілля; оператор.

Таблиця 1 – Параметри які впливають на невизначеність вимірювання твердості

Група		Джерело невизначеності	
1 Зразок, що випробовується		Занадто мала товщина зразка	
		Жорсткість опори (столика)	
		Занадто груба структура зерна	
		Шорсткість поверхні	
		Неоднорідний розподіл твердості	
2 Твердомір		Чистота поверхні	
		а) корпус приладу	Втрата на тертя
			Пружна деформація
			Несоосність шпинделя індентора
		б) система вимірювання діаметра відбитка	Похибка індикації
			Недостатнє розширення
			Числова апертура лінзи або освітлювача
			Неоднорідне освітлення відбитка
		в) система прикладання навантаження	Відхилення від номінальних сил
			Відхилення від тимчасових інтервалів циклу випробування
			Прикладання навантаження
			Перевантаження випробувальних сил
		г) індентори	Відхилення від ідеальної форми
Пошкодження			
Деформація під навантаженням			
3 Навколишнє середовище		Температурне відхилення або дрейф	
		Вібрація і удари	
4 Оператор		Неправильний вибір методу	
		Помилки при роботі, зчитуванні, оцінці результатів	

### Процедура оцінювання невизначеності вимірювань

Процедура розроблена згідно з Настановою з оцінювання невизначеності вимірювань (GUM) [6] та складається з наступних операцій.

**1. Запис моделі (рівняння) вимірювань.** При вимірюванні навантаження у Ньютонах та проведенні  $n$ -разових випробувань твердості, модельне рівняння має такий вигляд:

$$HB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{0,10197162 \cdot 2P}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - (d_i/D)^2}\right)} \right] + \varepsilon(HB), \quad (2)$$

де константа  $0,10197162=1/9,80665$  – коефіцієнт перерахування з кгс у Н;  $d_i$  – діаметр відтиску при  $i$ -му випробуванні;  $\varepsilon(HB)$  – поправка на випадкову похибку вимірювання твердості.

**2. Оцінювання вхідних величин.** Вимірювання твердості проводились за допомогою робочого еталона твердоміра-компаратора ТШ-2М, який відтворює значення тиску  $\hat{P}=30000$  кгс. В якості індентора в еталоні використовується сталеві сфера діаметром  $\hat{D}=10$  мм.

Результати вимірювання діаметрів відтисків  $d_1$  і  $d_2$  у протилежних напрямках та середні значення цих діаметрів  $d$  наведені у табл. 2.

Оскільки поправка на випадкову похибку вимірювання твердості є центрованою величиною, її значення  $\hat{\varepsilon}(HB)$  дорівнює нулю.

Таблиця 2 – Результати вимірювання діаметрів відтисків

№ випробування	$\hat{d}_1$ , мм	$\hat{d}_2$ , мм	$\hat{d}$ , мм
1	2,94	2,94	2,94
2	2,98	2,96	2,97
3	2,96	2,94	2,95
4	2,94	2,96	2,95
5	2,96	2,96	2,96

**3. Обчислення числового значення вимірюваної величини** здійснюється за формулою:

$$\overline{HB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n HB_i + \hat{\varepsilon}(HB), \quad (3)$$

$$HB_i = \frac{0,10197162 \cdot 2\hat{P}}{\pi \hat{D}^2 \left(1 - \sqrt{1 - (\hat{d}_i/\hat{D})^2}\right)}. \quad (4)$$

З урахуванням наведених значень вхідних величин, розраховуємо значення  $HB_i$  (табл. 3).

Таблиця 3 – Результати вимірювання твердості

№ випробування	$HB_i$ , HBW
1	440,6682
2	431,6059
3	437,6167
4	437,6167
5	434,5961

Середнє значення твердості  $\overline{HB}$ , яке приймається за результат вимірювання, дорівнює 436,4048HBW.

**4. Оцінювання стандартних невизначеностей вхідних величин.** Згідно технічних характеристик твердоміра-компаратора ТШ-2М границя похибки навантажень  $\delta_P$ , складає не більше  $\pm 1\%$ . Тому стандартна невизначеність типу В відтворення навантаження в припущенні рівномірного закону розподілу цієї похибки буде дорівнювати:

$$u_B(P) = \frac{\hat{P} \cdot \delta_P}{100 \cdot \sqrt{3}} = 173,21 \text{ кгс.} \quad (5)$$

Згідно з ГОСТ 9012-59 граничний відхил  $\theta_D$  діаметра кульки від номінального розміру для кульки 10 мм складає  $\pm 0,005$  мм. Тому стандартна невизначеність типу В відтворення діаметру кульки в припущенні рівномірного закону розподілу цього відхилення буде дорівнювати:

$$u_B(D) = \theta_D / \sqrt{3} = 0,002887 \text{ мм.} \quad (6)$$

Вимірювання діаметру відтиску залежить від похибки вимірювального мікроскопа МПБ-3. Згідно його технічних характеристик границя допустимої абсолютної похибки  $\theta_d$  в діапазоні вимірювання 0 - 3,0 мм складає  $\pm 0,012$  мм. Тому стандартна невизначеність типу В вимірювання діаметру відтиску в припущенні рівномірного закону розподілу цієї похибки буде дорівнювати:

$$u_B(d) = \theta_d / \sqrt{3} = 0,006928 \text{ мм.} \quad (7)$$

Стандартна невизначеність типу А, яка обумовлена розкидом наведених в табл. 3 значень твердості  $HB_i$  розраховується як:

$$u_A(\overline{HB}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (HB_i - \overline{HB})^2} = 1,5397 \text{ HBW.} \quad (8)$$

**5. Обчислення внесків невизначеностей вхідних величин у невизначеність вимірюваної величини.** Для цього спочатку обчислимо коефіцієнти чутливості до відповідних вхідних величин:

$$c_P(HB) = \frac{\partial HB}{\partial P} = \frac{0,10197162 \cdot 2}{\pi \hat{D}^2 \left(1 - \sqrt{1 - (\bar{d}/\hat{D})^2}\right)} = 0,01455 \text{ HBW/кгс;} \quad (9)$$

$$c_D(HB) = \frac{\partial HB}{\partial D} = \frac{0,10197162 \cdot 2P}{\pi \hat{D}^3 \sqrt{1 - (\bar{d}/\hat{D})^2}} = 2,0385 \text{ HBW/мм;} \quad (10)$$

$$c_d(HB) = \frac{\partial HB}{\partial d} = \frac{-0,10197162 \cdot 2Pd}{\pi \hat{D}^4 \left(1 - \sqrt{1 - (\bar{d}/\hat{D})^2}\right)^2} \times \frac{1}{\sqrt{1 - (\bar{d}/\hat{D})^2}} = -302,369 \text{ HBW/мм;} \quad (11)$$

$$c_\epsilon(HB) = \frac{\partial HB}{\partial \epsilon(HB)} = 1. \quad (12)$$

Тоді внески невизначеностей вхідних величин у невизначеність вимірюваної величини є такими:

$$u_P(HB) = c_P(HB) \cdot u_B(P) = 2,519 \text{ HBW;} \quad (13)$$

$$u_D(HB) = c_D(HB) \cdot u_B(D) = 0,0059 \text{ HBW;} \quad (14)$$

$$u_d(HB) = c_d(HB) \cdot u_B(d) = -2,095 \text{ HBW;} \quad (15)$$

$$u_\epsilon(HB) = c_\epsilon(HB) \cdot u_A(\overline{HB}) = 1,5397 \text{ HBW.} \quad (16)$$

**6. Обчислення стандартної невизначеності вимірюваної величини** здійснюється за формулою:

$$u(HB) = \sqrt{u_P^2(HB) + u_D^2(HB) + u_d^2(HB) + u_\epsilon^2(HB)} = 3,55 \text{ HBW.} \quad (17)$$

**7. Обчислення розширеної невизначеності** здійснюється за формулою:

$$U(HB) = k \cdot u(HB), \quad (18)$$

Де  $k$  – коефіцієнт охоплення, який обчислюється як коефіцієнт Стьюдента для ймовірності 0,95 та ефективного числа степенів свободи, яке розраховується по формулі Велча-Саттерсвейта:

$$v_{eff} = (n-1) \cdot \left[ \frac{u(HB)}{u_\epsilon(HB)} \right]^4 = 121. \quad (19)$$

В цьому випадку  $k = 1,98$  та розширена невизначеність  $U(HB)$  буде дорівнювати 7,17HBW:

**8. Запис результату вимірювання**

$$HB = (436,4 \pm 7,2) \text{ HBW}, p = 0,95. \quad (20)$$

**9. Складання бюджету невизначеності** наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Бюджет невизначеності

Вхідні величини	Значення вхідних величин	Стандартні невизначеності вхідних величин	Кількість степенів свободи	Коефіцієнти чутливості	Внески невизначеності, HBW
P	30000 кгс	173,205 кгс	$\infty$	0,0146HBW/кгс	2,519
D	10 мм	0,00289 мм	$\infty$	2,038HBW/мм	0,0059
d	2,954 мм	0,00693 мм	$\infty$	302,369 HBW/мм	-2,095
$\epsilon(H)$	0	1,5397HBW	4	1	1,5397
Вимірювана величина	Значення вимірюваної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективна кількість степенів свободи	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
HB	436,4HBW	3.62 HBW	122	1,98	7.2 HBW

Для валідації розробленої методики здійснений розрахунок невизначеності вимірювань методом Монте-Карло за допомогою програми NIST Uncertainty Machine [7]. Гістограма закону розподілу вимірюваної величини наведена на рис. 2.

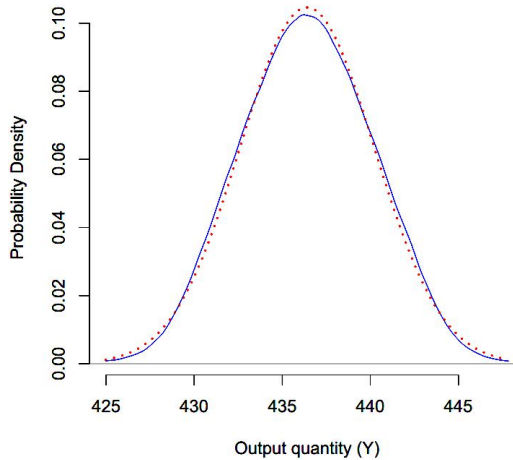


Рис. 2. Результати обчислення методом Монте-Карло

В табл. 5 наведено отримані результати обчислення, які добре співпадають з результатами розрахунку за методом GUM.

Таблиця 5 – Результати обчислення методом Монте-Карло

Параметр	Значення
Значення вимірюваної величини	436.41 HBW
Сумарна стандартна невизначеність	3.81 HBW
Розширена невизначеність	7.25 HBW

### Висновки

1. Розглянуто основні поняття та методи визначення твердості. Надано порівняльну характеристику найбільш популярних методів. Для подальших досліджень обрано метод Брінелля.

2. Розглянуті основні джерела невизначеності вимірювань твердості металу за методом Брінелля. Розроблено процедуру оцінювання невизначеності при вимірюванні твердості за методом Брінелля.

3. Складено бюджет невизначеності як основу для подальшої автоматизації розрахунків. Показано, що основними джерелами невизначеності є відтворення навантаження, вимірювання діаметру відбитку та відтворюваність вимірювань.

4. Для валідації розробленої процедури виконаний розрахунок невизначеності вимірювань методом Монте-Карло. Показано гарний збіг результатів, отриманих обома методами.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методы измерения твердости. Справ. издание / А.Г. Колмаков и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 128 с.
2. Маргинчук В.П., Полонський Л.Г. Становлення та розвиток методів визначення твердості матеріалів. Техніко-історичний аспект // Весник ХНАДУ / Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – Вып. 46. – С. 26-33.
3. Petik, F. The Unification of Hardness Measurement. Paris: BIML, 1991, p. 66-69.
4. ASTM E10 – 12. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.
5. ISO/IEC 17025:2017(en). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
6. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva, ISO, 1993. 101 p.
7. The NIST Uncertainty Machine. Available at : <https://uncertainty.nist.gov/>

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. І. П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Received (Надійшла) 15.05.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.07.2019

### Оценивание неопределенности измерений твердости металлов методом Бринелля

А. Н. Паценко

**Целью статьи** является разработка процедуры оценивания неопределенности измерений твердости металлов методом Бринелля. **Результаты.** Проанализированы основные методы измерения твердости. Рассмотрены особенности измерения твердости металлов методом Бринелля и приведены основные источники неопределенности. Разработана процедура оценивания неопределенности измерений твердости металлов методом Бринелля и приведен пример оценивания неопределенности. Проведена валидация разработанной процедуры методом Монте-Карло.

**Ключевые слова:** твердость металла, метод Бринелля, неопределенность измерений, бюджет неопределенности, метод Монте-Карло.

### Evaluation of the uncertainty of measurements of hardness of metals by the Brinell method

A. Patsenko

The basic concepts and methods of measuring hardness are analyzed. Comparative characteristics of the most common methods are provided. The features of measuring the hardness of metals by the Brinell method are considered and the main sources of uncertainty are given. A procedure for measurement uncertainty evaluation of metal hardness by the Brinell method has been developed. This procedure includes next steps: modelling the measurement, evaluating input quantities, evaluating the measurand, estimating standard uncertainties of input quantities, calculating the contributions of the measurement uncertainties of input quantities to the uncertainty of the measurand, calculating the combined standard uncertainty, calculating the expanded uncertainty, reporting and recording measurement result. An example of uncertainty evaluation is given. An uncertainty budget has been drawn up as a basis for further automation of calculations. It is shown that the main sources of uncertainty are reproduction of the load, measurement of the diameter of the print and repeatability of measurements. To validate the developed procedure, the calculation of the measurement uncertainty by the Monte Carlo method was performed. Good agreement between the results obtained by both methods is shown.

**Keywords:** metal hardness, Brinell method, measurement uncertainty, uncertainty budget, Monte Carlo method.

І. М. Федотова-Півень<sup>1</sup>, Н. В. Лада<sup>1</sup>, Г. В. Канашевич<sup>1</sup>, М. О. Пустовіт<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

<sup>2</sup> Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, Черкаси, Україна

## ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ДВОХОПЕРАНДНОЇ ЧОТИРЬОХРОЗРЯДНОЇ ОПЕРАЦІЇ МІНІМАЛЬНОЇ СКЛАДНОСТІ ДЛЯ СТРОГОГО СТІЙКОГО КРИПТОГРАФІЧНОГО КОДУВАННЯ

Розвиток методів строгого стійкого криптографічного кодування як одного з напрямків криптографічного кодування і декодування на основі логічних функцій є важливим, тому що приводить до значної невизначеності значення кожного біта незакодованого повідомлення при спробах декодування повідомлення. В статті для захисту інформаційних ресурсів застосовано логічні функції в операції матричного криптографічного перетворення інформації на основі додавання за модулем два. Розроблено технологію побудови двохоперандної чотирьохрозрядної операції мінімальної складності з властивістю строгого стійкого криптографічного кодування. Таке строге стійке криптографічне кодування призводить до значної невизначеності значення кожного біта незакодованого повідомлення при спробах декодування закодованого повідомлення. Технологія перевірена шляхом створення однієї з двохоперандних чотирьохрозрядних операцій для потокового шифрування.

**Ключові слова:** криптографічне перетворення, логічні функції, додавання за модулем два, строге стійке криптографічне кодування.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Розробка нових швидкодійних методів криптографічного кодування і декодування на основі логічних функцій над великою кількістю змінних і впровадження цих методів в цифрових пристроях важлива для криптографічної науки і практики криптографії. Розвиток методів строгого стійкого криптографічного кодування як одного з напрямків криптографічного кодування і декодування на основі логічних функцій є важливим, тому що приводить до значної невизначеності значення кожного біта незакодованого повідомлення при спробах декодування повідомлення [1-8].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [1, 9-11] створені та частково досліджені одноопераційні чотирьохрозрядні операції мінімальної складності з властивістю строгого стійкого криптографічного кодування. Проте, залишається не вирішеною актуальна задача розробки методів створення двохоперандних чотирьохрозрядних операцій мінімальної складності для строгого стійкого криптографічного кодування.

**Метою статті** є розробка технології побудови двохоперандних чотирьохрозрядних операцій мінімальної складності для строгого стійкого криптографічного кодування.

### Основний зміст

Як відомо, *транспозицією* є перестановка, яка міняє місцями два елемента, а всі інші лишає нерухомими. Повний набір одноопераційних чотирьохрозрядних операцій мінімальної складності містить 42 операції в залежності від числа транспозицій [1]. Ці операції створено шляхом інверсії двох розрядів і транспозицій [1].

Виберемо 16 операцій з 42 для створення чотирьохрозрядної двохоперандної операції строгого стійкого криптографічного кодування з урахуванням таких вимог: 1) для 4-х розрядів операція з одним

інвертованим переставленим розрядом і одним інвертованим не переставленим іншим розрядом має властивість строгого стійкого криптографічного кодування; 2) інверсія не переставленого розряду приводить до однозначного визначення біта, який інвертується не залежно від значення цього біта; 3) інверсія переставленого розряду робить невизначеним біт, який інвертується [1]; 4) збільшення кількості транспозицій елементів приводить до зменшення залежності результату шифрування від гамуючої послідовності і до збільшення складності реалізації алгоритму.

Вимогам 1-4 задовольняють операції, які можливо отримати з базового набору операцій  $F_1^4 - F_6^4$  [1] шляхом однієї транспозиції елементів, наприклад  $F_7^4 - F_{22}^4$  з табл. 2 (верхній індекс для F означає розрядність операції, а нижній – порядковий номер операції). Так, кожна результуюча операція (P) з табл. 1 (П – початкова операція, P – результуюча операція) отримана з відповідної початкової (базової) операції з допомогою вказаної транспозиції елементів з урахуванням вимог 1-4.

Таблиця 1 – Отримання операцій строгого стійкого криптографічного кодування з однією транспозицією елементів

Р	Т	П	Р	Т	П
$F_3^4$	$x_2, x_4 \oplus 1$	$F_7^4$	$F_2^4$	$x_2, x_3 \oplus 1$	$F_{13}^4$
$F_1^4$	$x_4, x_2 \oplus 1$	$F_8^4$	$F_1^4$	$x_2 \oplus 1, x_3$	$F_{16}^4$
$F_6^4$	$x_2, x_4 \oplus 1$	$F_9^4$	$F_6^4$	$x_2, x_3 \oplus 1$	$F_{17}^4$
$F_4^4$	$x_4, x_2 \oplus 1$	$F_{10}^4$	$F_5^4$	$x_2 \oplus 1, x_3$	$F_{18}^4$
$F_3^4$	$x_3, x_4 \oplus 1$	$F_{11}^4$	$F_4^4$	$x_1, x_2 \oplus 1$	$F_{19}^4$
$F_2^4$	$x_3 \oplus 1, x_4$	$F_{12}^4$	$F_5^4$	$x_1, x_2 \oplus 1$	$F_{20}^4$
$F_5^4$	$x_3, x_4 \oplus 1$	$F_{13}^4$	$F_2^4$	$x_1 \oplus 1, x_2$	$F_{21}^4$
$F_4^4$	$x_3 \oplus 1, x_4$	$F_{14}^4$	$F_3^4$	$x_1 \oplus 1, x_2$	$F_{22}^4$

Застосуванням двох транспозицій до кожної операції з базового набору  $F_1^4 - F_6^4$  з урахуванням вимог 1-4 можливо отримати операції  $F_{31}^4 - F_{42}^4$  (табл. 2).

Таблиця 2 – Чотирихрозрядні однооперандні операції строгого стійкого криптографічного кодування

Без транспозицій			
$F_1^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$	$F_2^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_4 \end{bmatrix}$	$F_3^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix}$	
$F_4^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_4 \end{bmatrix}$	$F_5^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_6^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix}$	
Одна транспозиція в наборі з чотирьох елементів			
$F_7^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_8^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_4 \\ x_3 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_9^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_{10}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_4 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
$F_{11}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \end{bmatrix}$	$F_{12}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_4 \\ x_3 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{13}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \end{bmatrix}$	$F_{14}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_4 \\ x_3 \oplus 1 \end{bmatrix}$
$F_{15}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_4 \end{bmatrix}$	$F_{16}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_4 \end{bmatrix}$	$F_{17}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{18}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix}$
$F_{19}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_4 \end{bmatrix}$	$F_{20}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \\ x_3 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{21}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_4 \end{bmatrix}$	$F_{22}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix}$
$F_{23}^4 = \begin{bmatrix} x_3 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_1 \\ x_4 \end{bmatrix}$	$F_{24}^4 = \begin{bmatrix} x_3 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_1 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{25}^4 = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_4 \end{bmatrix}$	$F_{26}^4 = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_2 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix}$
$F_{27}^4 = \begin{bmatrix} x_4 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{28}^4 = \begin{bmatrix} x_4 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{29}^4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{30}^4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_2 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$
Дві транспозиції в наборі з чотирьох елементів			
$F_{31}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \end{bmatrix}$	$F_{32}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \\ x_4 \\ x_3 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{33}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \end{bmatrix}$	$F_{34}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_4 \\ x_3 \oplus 1 \end{bmatrix}$
$F_{35}^4 = \begin{bmatrix} x_3 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_{36}^4 = \begin{bmatrix} x_3 \oplus 1 \\ x_4 \\ x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{37}^4 = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_{38}^4 = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
$F_{39}^4 = \begin{bmatrix} x_4 \oplus 1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{40}^4 = \begin{bmatrix} x_4 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{41}^4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{42}^4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_3 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$

По аналогії з моделлю двоохрозрядного двооперандного додавання за модулем два [12] використаємо операції  $O$  для всіх можливих наборів  $(k_1-k_4)$  значень чотирьох розрядів  $(k_i \in \{0,1\}, i=1,4)$  як керуючих сигналів для побудови двооперандної 4-хрозрядної операції додавання за модулем 2, яка має властивість строгого стійкого криптографічного кодування:

$$O = \begin{cases} F_7^4, & \text{для } k_1 = 0; k_2 = 0, k_3 = 0; k_4 = 0; \\ F_8^4, & \text{для } k_1 = 0; k_2 = 0, k_3 = 0; k_4 = 1; \\ F_9^4, & \text{для } k_1 = 0; k_2 = 0, k_3 = 1; k_4 = 0; \\ F_{10}^4, & \text{для } k_1 = 0; k_2 = 0, k_3 = 1; k_4 = 1; \\ F_{11}^4, & \text{для } k_1 = 0; k_2 = 1, k_3 = 0; k_4 = 0; \\ F_{12}^4, & \text{для } k_1 = 0; k_2 = 1, k_3 = 0; k_4 = 1; \\ F_{13}^4, & \text{для } k_1 = 0; k_2 = 1, k_3 = 1; k_4 = 0; \\ F_{14}^4, & \text{для } k_1 = 0; k_2 = 1, k_3 = 1; k_4 = 1; \\ F_{15}^4, & \text{для } k_1 = 1; k_2 = 0, k_3 = 0; k_4 = 0; \\ F_{16}^4, & \text{для } k_1 = 1; k_2 = 0, k_3 = 0; k_4 = 1; \\ F_{17}^4, & \text{для } k_1 = 1; k_2 = 0, k_3 = 1; k_4 = 0; \\ F_{18}^4, & \text{для } k_1 = 1; k_2 = 0, k_3 = 1; k_4 = 1; \\ F_{19}^4, & \text{для } k_1 = 1; k_2 = 1, k_3 = 0; k_4 = 0; \\ F_{20}^4, & \text{для } k_1 = 1; k_2 = 1, k_3 = 0; k_4 = 1; \\ F_{21}^4, & \text{для } k_1 = 1; k_2 = 1, k_3 = 1; k_4 = 0; \\ F_{22}^4, & \text{для } k_1 = 1; k_2 = 1, k_3 = 1; k_4 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Створимо двооперандні чотирихрозрядні операції строгого стійкого криптографічного кодування на основі однооперандних операцій з їх почерговим додаванням за модулем два таким чином:

$$O^k = O^{k*} \oplus \bar{O}^k, \quad (2)$$

де  $O^k$  – модель чотирихрозрядної двооперандної операції строгого стійкого криптографічного кодування,  $O^{k*}$  – модель спрощеної операції, без врахування інверсій функцій,  $\bar{O}^k$  – модель обробки сигналів інверсії функцій даної операції.

Для створення  $O^{k*}$  побудуємо таблиці істинності моделі даної спрощеної операції. Для цього використаємо матричне представлення операцій без врахування сигналів інверсії, в поєднанні з додаванням за модулем два до матриці інверсій (табл. 3).

В результаті отримаємо таблицю істинності функції однооперандної операції відповідає змінна в моделі спрощеної операції, а узагальнена модель однооперандної операції визначається також відповідним набором команд керування. Після мінімізації отримуємо наступні функції для спрощеної моделі:

Для побудови  $f_1(x, y)$  отримуємо:

$$f_1(x_1, y) = x_1 \cdot (\bar{y}_1 \vee \bar{y}_2); \quad f_1(x_3, y) = 0; \\ f_1(x_2, y) = x_2 \cdot (y_1 \cdot y_2); \quad f_1(x_4, y) = 0.$$

В результаті об'єднання цих функцій з допомогою додавання за модулем два маємо  $f_1(x, y)$ :

$$f_1(x, y) = x_1 \cdot (\bar{y}_1 \vee \bar{y}_2) \oplus x_2 \cdot (y_1 \cdot y_2) = \\ = x_1 \cdot \overline{(y_1 \cdot y_2)} \oplus x_2 \cdot (y_1 \cdot y_2) \quad (3)$$

або  $f_1(x, y) = x_1 \cdot (y_1 \cdot y_2) \vee x_2 \cdot (y_1 \cdot y_2).$



Таблиця 3 – Матричне представлення вибраних однооперандних операцій

$F_7^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0001 \\ 0010 \\ 0100 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$F_8^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_4 \\ x_3 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0001 \\ 0010 \\ 0100 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$F_9^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0001 \\ 0010 \\ 0100 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$F_{10}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_4 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0001 \\ 0010 \\ 0100 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
$F_{11}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0001 \\ 0010 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$F_{12}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_4 \\ x_3 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0001 \\ 0010 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$F_{13}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0001 \\ 0010 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$F_{14}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_4 \\ x_3 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0001 \\ 0010 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
$F_{15}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0010 \\ 0100 \\ 0001 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$F_{16}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0010 \\ 0100 \\ 0001 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$F_{17}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_2 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0010 \\ 0100 \\ 0001 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$F_{18}^4 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_2 \oplus 1 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0010 \\ 0100 \\ 0001 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
$F_{19}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0100 \\ 1000 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$F_{20}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \\ x_3 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0100 \\ 1000 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$F_{21}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_3 \oplus 1 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0100 \\ 1000 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$F_{22}^4 = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \\ x_3 \\ x_4 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0100 \\ 1000 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

Таблиця 4 – Таблиця істинності для моделі спрощеної операції

Операція	Команди (аргумент $y$ )				Параметри елементів спрощеної моделі															
					$f_1(x, y)$				$f_2(x, y)$				$f_3(x, y)$				$f_4(x, y)$			
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$F_7^4$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$F_8^4$	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$F_9^4$	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$F_{10}^4$	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$F_{11}^4$	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
$F_{12}^4$	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
$F_{13}^4$	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
$F_{14}^4$	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
$F_{15}^4$	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
$F_{16}^4$	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
$F_{17}^4$	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
$F_{18}^4$	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
$F_{19}^4$	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
$F_{20}^4$	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
$F_{21}^4$	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
$F_{22}^4$	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

Побудуємо  $f_2(x, y)$  :

$$f_2(x_1, y) = x_1 \cdot (y_1 \cdot y_2) ; f_2(x_3, y) = x_3 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) ;$$

$$f_2(x_2, y) = x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) ; f_2(x_4, y) = x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) .$$

В результаті об'єднання цих функцій з допомогою додавання за модулем два маємо  $f_2(x, y)$  :

$$f_2(x, y) = x_1 \cdot (y_1 \cdot y_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \oplus x_3 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) , \quad (4)$$

або 
$$f_2(x, y) = x_1 \cdot (y_1 \cdot y_2) \vee x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \vee x_3 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \vee x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) .$$

Побудуємо  $f_3(x, y)$  :

$$f_3(x_1, y) = 0 ; f_3(x_2, y) = x_2 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) ;$$

$$f_3(x_3, y) = x_3 \cdot (y_1 \oplus y_2 \oplus 1) ; f_3(x_4, y) = x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) .$$

В результаті об'єднання цих функцій з допомогою додавання за модулем два отримуємо  $f_3(x, y)$  :

$$f_3(x, y) = x_2 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_3 \cdot (y_1 \oplus y_2 \oplus 1) \oplus x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \quad (5)$$

або 
$$f_3(x, y) = x_2 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \vee x_3 \cdot (y_1 \oplus y_2 \oplus 1) \vee x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) .$$

Побудуємо  $f_4(x, y)$ :

$$f_4(x_1, y) = 0; \quad f_4(x_2, y) = x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2);$$

$$f_4(x_3, y) = x_3 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2); \quad f_4(x_4, y) = x_4 \cdot y_1.$$

В результаті об'єднання цих функцій з допомогою додавання за модулем два маємо  $f_4(x, y)$ :

$$f_4(x, y) = x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_3 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \oplus x_4 \cdot y_1 \quad (6)$$

або  $f_4(x, y) = x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) \vee x_3 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \vee x_4 \cdot y_1.$

З допомогою формул (3) – (6) створимо модель спрощеної операції:

$$O^{k*} = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (\overline{y_1 \cdot y_2}) \oplus x_2 \cdot (y_1 \cdot y_2) \\ x_1 \cdot (y_1 \cdot y_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \oplus \\ \oplus x_3 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) \\ x_2 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_3 \cdot (y_1 \oplus y_2 \oplus 1) \oplus \\ \oplus x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \\ x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_3 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \oplus x_4 \cdot y_1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для створення моделі обробки сигналів інверсії функцій даної операції побудуємо таблицю істинності (табл. 5).

Таблиця 5 – Таблиця істинності моделі обробки сигналів інверсії функцій для операції строгого стійкого криптографічного кодування

Команди (аргумент $y$ )				Параметри інверсії функцій			
$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$\bar{f}_1$	$\bar{f}_2$	$\bar{f}_3$	$\bar{f}_4$
0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	1
0	0	1	0	0	1	1	0
0	0	1	1	0	0	1	1
0	1	0	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	1	0	1
1	0	0	0	1	1	0	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	0	1	0	0	1	0	1
1	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	0	1	0	1	0
1	1	0	1	1	0	0	1
1	1	1	0	0	1	1	0
1	1	1	1	0	1	0	1

За результатами мінімізації маємо:

$$\bar{f}_1 = \bar{y}_3; \quad \bar{f}_2 = y_2 \cdot y_3 \vee \bar{y}_2 \cdot \bar{y}_4;$$

$$\bar{f}_3 = y_1 \cdot \bar{y}_4 \cdot y_3 \vee \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_3 \vee y_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_4;$$

$$\bar{f}_4 = \bar{y}_1 \cdot y_4 \vee y_2 \cdot y_4 \vee y_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_3.$$

$$\bar{O}^k = \begin{bmatrix} \bar{y}_3 \\ y_2 \cdot y_3 \vee \bar{y}_2 \cdot \bar{y}_4 \\ y_1 \cdot \bar{y}_4 \cdot y_3 \vee \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_3 \vee y_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_4 \\ \bar{y}_1 \cdot y_4 \vee y_2 \cdot y_4 \vee y_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_3 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Підставимо (7) і (8) у (2) і отримаємо чотирьохрозрядну двооперандну операцію строгого стійкого криптографічного кодування:

$$O^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (\overline{y_1 \cdot y_2}) \oplus x_2 \cdot (y_1 \cdot y_2) \\ x_1 \cdot (y_1 \cdot y_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \oplus x_3 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus \\ \oplus x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) \\ x_2 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_3 \cdot (y_1 \oplus y_2 \oplus 1) \oplus x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \\ x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_3 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \oplus x_4 \cdot y_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} \bar{y}_3 \\ y_2 \cdot y_3 \vee \bar{y}_2 \cdot \bar{y}_4 \\ y_1 \cdot \bar{y}_4 \cdot y_3 \vee \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_3 \vee y_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_4 \\ \bar{y}_1 \cdot y_4 \vee y_2 \cdot y_4 \vee y_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_3 \end{bmatrix};$$

$$O^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (\overline{y_1 \cdot y_2}) \oplus x_2 \cdot (y_1 \cdot y_2) \oplus \bar{y}_3 \\ x_1 \cdot (y_1 \cdot y_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \oplus x_3 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus \\ \oplus x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus y_2 \cdot y_3 \vee \bar{y}_2 \cdot \bar{y}_4 \\ x_2 \cdot (y_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_3 \cdot (y_1 \oplus y_2 \oplus 1) \oplus \\ \oplus x_4 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \oplus y_1 \cdot \bar{y}_4 \cdot y_3 \vee \\ \vee \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_3 \vee y_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_4 \\ x_2 \cdot (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2) \oplus x_3 \cdot (\bar{y}_1 \cdot y_2) \oplus x_4 \cdot y_1 \oplus \\ \oplus \bar{y}_1 \cdot y_4 \vee y_2 \cdot y_4 \vee y_1 \cdot \bar{y}_2 \cdot y_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Операція (9) забезпечує оброблення чотирьох біт інформації за критерієм строгого стійкого криптографічного кодування. Таким чином, дану узагальнену модель можна розглядати як узагальнену двооперандну чотирьохрозрядну операцію з властивістю строгого стійкого криптографічного кодування. Запропоновану послідовність математичних перетворень, яка забезпечує побудову узагальненої моделі операцій можна розглядати як технологію побудови двооперандної чотирьохрозрядної операції мінімальної складності з властивістю строгого стійкого криптографічного кодування.

### Висновки

Запропонована технологія побудови двооперандної чотирьохрозрядної операції мінімальної складності з властивістю строгого стійкого криптографічного кодування, яка перевірена шляхом створення однієї з двооперандних чотирьохрозрядних операцій для потокового шифрування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В. М. Рудницький, Л. А. Шувалова, О. Б. Нестеренко. Побудова примітивів строгого стійкого кодування мінімальної складності. Вісник Черкаського державного технологічного університету №1, 2018, с. 21-26.
2. Manikandan V, Porkodi V, Mohammed AS, Sivaram M, "Privacy Preserving Data Mining Using Threshold Based Fuzzy smeans Clustering", ICTACT Journal on Soft Computing, Volume 9, Issue 1, 2018, pp.1813-1816. DOI: [10.21917/ijsc.2018.0252](https://doi.org/10.21917/ijsc.2018.0252)
3. Saravanan S., Hailu M., Gouse G.M., Lavanya M., Vijaysai R. Optimized Secure Scan Flip Flop to Thwart Side Channel Attack in Crypto-Chip. *International Conference on Advances of Science and Technology*, ICAST 2018. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Vol 274. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15357-1\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15357-1_34)

4. Amin Salih M., Yuvaraj D., Sivaram M., Porkodi V. Detection And Removal Of Black Hole Attack In Mobile Ad Hoc Networks Using Grp Protocol. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. Vol. 9, No 6. P. 1–6, DOI: <http://dx.doi.org/10.26483/ijarcs.v9i6.6335>
5. Mozhaev O. Multiservice network security metric / O. Mozhaev, H. Kuchuk, N. Kuchuk, M. Mozhaev, M. Lohvynenco // IEEE Advanced information and communication technologies-2017. Proc. of the 2th Int. Conf. – Lviv, 2017. – P. 133-136.
6. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
7. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study”, Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
8. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
9. Рудницький В.М. Синтез операцій криптографічного перетворення за критерієм строгого стійкого кодування / В.М. Рудницький, Л.А. Шувалова, О. Б. Нестеренко // Часопис “Вісник інженерної академії України”. – Київ, 2016. – Вип. 3. – С.105-108.
10. Рудницький В.М. Метод синтезу операцій криптографічного перетворення за критерієм строгого стійкого кодування / В.М. Рудницький, Л.А. Шувалова, О.Б. Нестеренко // “Вісник ЧДТУ”. - Черкаси, 2017. – Вип. 1. – С.5-10.
11. Шувалова Л.А. Синтез та аналіз криптографічних операцій за критерієм строгого стійкого кодування / Л.А. Шувалова, О.Б. Нестеренко // тези доповідей IV міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми інформатизації”, 3-4 листопада 2016р. – Черкаси: ЧДТУ; Баку: ВА ЗСАР; Бельсько-Бяла: УТІГН; Полтава: ПНТУ, 2016. – С. 14.
12. Бабенко В. Г., Лада Н. В., Лада С. В. Аналіз множин операцій, синтезованих на основі додавання за модулем два. Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: тези доп. П'ятої міжнар. наук.- практ. конф., (Вінниця, 19–21 квіт. 2016). Вінниця: Нілан - ЛТД, 2016. С. 54–57.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,  
 Національний технічний університет «ХПІ», Харків  
 Received (Надійшла) 06.06.2019  
 Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

#### **Технология построения двухоперандной четырехразрядной операции минимальной сложности для строгого устойчивого криптографического кодирования**

И. Н. Федотова-Пивень, Н. В. Лада, Г. В. Канашевич, М. О. Пустовит

Развитие методов строгого устойчивого криптографической кодирования как одного из направлений криптографической кодирования и декодирования на основе логических функций является важным, так как приводит к значительной неопределенности значение каждого бита незакодированный сообщение при попытках декодирования сообщения. В статье для защиты информационных ресурсов применены логические функции в операции матричного криптографического преобразования информации на основе сложения по модулю два. Разработана технология построения двухоперандной четырехразрядной операции минимальной сложности со свойством строгого устойчивого криптографического кодирования. Такое строгое устойчивое криптографическое кодирование приводит к значительной неопределенности значения каждого бита незакодированного сообщения при попытках декодирования закодированного сообщения. Технология проверена путем создания одной из двухоперандных четырехразрядных операций для потокового шифрования.

**Ключевые слова:** криптографическое преобразование, логические функции, сложение по модулю два, строгое устойчивое криптографическое кодирование.

#### **The technology of building a two-operand four-bit operation of minimal complexity for strictly sustainable cryptographic coding**

I. Fedotova-Piven, N. Lada, G. Kanashevych, M. Pustovit

In the article were applied logical functions in the operation matrix cryptographic transformation of information based on addition modulo two for the protection of the confidential information resources. It was developed a construction technology of the two-operand four-bit operation of minimal complexity with a property of strictly sustainable cryptographic coding. This construction technology consists in the fact that pair-wise inverting of a certain number of digits is performed and a half of digits of the input information is inverted, while taking into account the limitations that only one digit can be inverted in each transposition of the digits. Such strictly sustainable cryptographic coding leads to a large uncertainty in the value of each bit of the uncoded message when attempting to decode the encoded message. The two-operand four-bit operation with the strictly sustainable cryptographic coding property is created on the basis of one-operand operations with their sequential addition modulo two. A complete set of one-operand four-bit operations of minimal complexity contains 42 operations depending on the number of transpositions (zero, one and two transpositions). For the construction of this two-operand four-bit operation of minimal complexity with the strictly sustainable cryptographic coding property, 16 four-bit operations were chosen, obtained from the basic four-bit operations by one transposition in which only one bit is inverted. The truth tables were constructed for a simplified operation model without taking into account the signals of the inversion of functions, and then a model of a generalized operation was constructed taking into account the inversion of functions. The proposed technology for constructing a two-operand four-bit operation of minimal complexity with the strictly sustainable cryptographic coding property is verified by creating one of the two-operand four-bit operations for stream encryption.

**Keywords:** cryptographic transformation, logical functions, addition modulo two, strictly sustainable cryptographic encoding, matrix operations, mathematical model.

В. С. Харченко, В. Я. Певнєв

Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

**ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ПАРАЛЕЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ ФАКТОРИЗАЦІЇ**

Розглядається технологія розпаралелювання процесу факторизації великих чисел, заснована на зміні відстані між співмножники на числової осі. Представлений і проаналізовано алгоритм факторизації, який аналізує не співмножники, а складові, що дозволяє швидко вирішувати завдання факторизації як при близьких співмножником, так і при значно відрізняються один від одного. Алгоритм факторизації, заснований на рішенні нерівності, дозволяє відсікати велику кількість варіантів співмножників, які не є рішенням поставленої задачі. Проведені експериментальні дослідження показали хороші результати вирішення завдання факторизації з використанням можливого розпаралелювання цього процесу.

**Ключові слова:** алгоритми факторизації, технологія розпаралелювання, найбільший спільний дільник, алгоритм квадратичного решета

**Вступ**

**Постановка проблеми.** Задача факторизації є однією з самих відомих в теорії чисел. З цим завданням стикаються школярі, коли їм необхідно розкласти число на множники. Незважаючи на гадану простоту цієї задачі, фахівці стикаються з труднощами, які обумовлені трудомісткістю факторизації великих чисел [1–7].

Велика увага до даної задачі виникла завдяки появі асиметричного шифрування, заснованому саме на складності факторизації великих чисел. Під великими числами маються на увазі числа розміром у двісті і більше десяткових знаків.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні для практичного застосування існує два великі класи алгоритмів факторизації. Це експоненціальні алгоритми, складність яких залежить від довжини числа (метод Ферма,  $\rho$  і  $(\rho - 1)$  алгоритм Полларда) і субекспоненціальні (алгоритм Діксону, методи Ленстра, квадратичного решета і решета числового поля). Ці та деякі інші алгоритми досить детально описані в [1, 2]. Багато дослідників з надією дивляться на алгоритм Шора [3], але в осяжному майбутньому побудови квантового комп'ютера є лише надією

Більшість дослідників говорять про те, що, незважаючи на велику кількість існуючих методів, задача факторизації залишається актуальною темою. Існує декілька шляхів вирішення цієї проблеми - розробка принципово нових підходів до рішення задачі факторизації, розпаралелювання відомих алгоритмів, використання швидких обчислень та ін.

**Метою статті** є розробка технології розпаралелювання процесу факторизації та її експериментальне дослідження.

**Основна частина**

Розглядаючи підходи до процесу розпаралелювання, можна дійти наступних висновків.

Існує два підходи. Перший підхід - розпаралелюється сам обчислювальний процес усередині алгоритму, тобто одночасно виконуються ті позиції алгоритму, які незалежні. Другий підхід - одночасно виконується алгоритм на різних вхідних даних.

Найчастіше ці підходи виконуються одночасно, що дозволяє значно зменшити час розв'язання задачі.

Розглянемо один з алгоритмів факторизації, представлений в [8]. Цей алгоритм ґрунтується на наступній теоремі: Якщо хоча б в одному з варіантів представлення псевдопростого числа у вигляді двох доданків, ці доданки виявляться не взаємно простими числами, то дане число є складеним. Алгоритм виглядає таким чином:

1. З заданого числа обчислюється квадратний корінь і отриманий результат округляється в меншу сторону
2. Обчислюється різниця між заданим числом і числом, отриманим в п. 1
3. Отримані числа розкладаються на співмножники.
4. Якщо в співмножником є хоч би одно однакове число, то перейти до п. 8
5. З меншого числа віднімається одиниця
6. Якщо отриманий результат  $> 1$ , то перехід до п. 2.
7. Число просте.
8. Число складене.

За своєю ідеєю представлений метод схожий з квадратичним решетом. Відмінність складає те, що число, отримане в результаті обчислення квадратного кореня, в запропонованому методі зменшується. Це обумовлено тим, що більше кореня квадратного може бути максимум один співмножник, а решта будуть менше отриманого кореня.

Як приклад розглянемо число 996533 [8]. Квадратний корінь з цього числа, округлений в меншу сторону буде дорівнює 998. У табл. 1 в колонках один і два знаходяться рівні і менше числа 998 і їх розкладання, згідно з основною теоремою арифметики. У третій колонці - числа, отримані як різниця між числом, що факторизується, і числами в першій колонці. У четвертій колонці розкладання чисел з третьої колонки. У п'ятій колонці - найбільший спільний дільник.

На підставі отриманого результату одне з чисел, яке є з'єднанням числа 996533, становить 89, а друге -  $11 + 2 * 7 * 17 * 47 = 11197$ .

Наскільки ефективний такий спосіб факторизації числа?

Таблиця 1 – Розкладання числа 996533

I	II	III	IV	V
998	2*499	995535	3*3*5*22123	1
997	PN	995536	2 <sup>4</sup> *43*1447	1
996	2 <sup>2</sup> *3*83	995537	17*157*373	1
995	5*199	995538	2*3*277*599	1
994	2*7*71	995539	PN	1
993	3*331	995540	2 <sup>2</sup> *5*7*13*547	1
992	2 <sup>5</sup> *31	995541	3*29*11443	1
991	PN	995542	2*497771	1
990	2*3 <sup>2</sup> *5*11	995543	19*151*347	1
989	23*43	995544	2 <sup>3</sup> *3 <sup>3</sup> *11*419	1
988	2 <sup>2</sup> *13*19	995545	5*199109	1
987	3*7*47	995546	2*497773	1
986	2*17*29	995547	3*7*47407	1
985	5*197	995548	2*2*248887	1
984	2 <sup>3</sup> *3*41	995549	PN	1
983	PN	995550	2*3*5 <sup>2</sup> *6637	1
982	2*491	995551	PN	1
981	3 <sup>2</sup> *109	995552	2 <sup>5</sup> *53*587	1
980	2 <sup>2</sup> *5*7 <sup>2</sup>	995553	3 <sup>2</sup> *13*67*127	1
979	11*89	995554	2*7*17*47*89	89

Очевидно, що досить великий час витратиться на розкладання великого числа на співмножники. Виходячи з поставленою задачі по знаходженню спільної співмножника, має сенс використовувати усім відомий алгоритм Евкліда для знаходження найбільшого спільного дільника.

Перш ніж перейти до використання алгоритму Евкліда слід зазначити ще одну закономірність. Більшість розглянутих пар мають в своєму складі перші десять простих чисел від 2 до 29. Якщо перемножити ці числа, то в результаті вийде число 6469693230.

Визначимо НСД чисел 6469693230 та 996533. НСД (6469693230, 996533) = 1. Це означає, що наше досліджуване число не ділиться без залишку ні на одне просте число, яке менше або дорівнює 29. Це означає, що як тільки залишок від ділення в будь-якій ітерації стане рівним або менше числа 29, то можна однозначно стверджувати, що НСД цих чисел буде рівним 1. Використовуючи добуток десяти наступних простих чисел від 31 до 71, можна обчислити НСД цієї пари чисел. При цьому обчислення можна закінчувати, коли залишок від ділення в будь-якій ітерації стане рівним або менше числа 71.

Аналогічно можна визначити максимальне число, на якому можна закінчувати процес факторизації. Цим числом буде максимальне просте число, яке використовувалося при для побудови тестової послідовності для обчислення НСД.

Якщо розглядати табл. 1, то НСД необхідно шукати між I і II числами, представленими в першій і третій колонками відповідно. Результат представлений в п'ятій колонці.

Можливість застосування методів відшукування НСД досить продуктивна. Хоча це є не що інше, як метод пробного ділення, але його швидкодія набагато вище. Це можна досягти за рахунок попереднього обчислення добутку простих чисел, причому їх кількість в ньому може бути досить великим. Наприклад,

якщо перемножити усі прості числа, які менше 1000, а таких чисел 169, і НСД = 1, то ймовірність того, що число, яке перевіряється, складене, буде дорівнює  $2^{-169}$  [9]. Слід зазначити і той факт, що результати попереднього обчислення можна зберігати в базі даних, яка буде постійно поповнюватися.

Якщо проаналізувати табл. 1, то можна виявити ще одну закономірність, яка не відразу впадає в око. При зменшенні числа з першої колонки до 890 знову НСД стане рівним 89. І такий результат буде з'являтися з кроком 89.

Розглянемо дані, представлені в табл. 2 [10]. У першому і другому стовпчику таблиці знаходяться співмножники числа, яке потрібно факторизувати. У третьому стовпці – квадратний корінь з добутку представлених чисел, округлений до цілого в меншу сторону. У четвертому стовпці величина числа, відповідна колонки 1 табл.2, на рядку якого був знайдений НСД  $\neq 1$ . У п'ятому стовпці представлено кількість кроків до знаходження НСД. Незважаючи на малий розмір чисел, які знаходяться в табл. 2, їх аналіз дозволяє зробити дуже цікаві висновки. Як в більшості алгоритмів знайти «близькі» співмножники не складає особливих труднощів. Якщо різниця в величині співмножників більш ніж в чотири рази, то розмір кроку може коливатися від одиниці до величини меншого співмножника.

Таблиця 2 – Результати факторизації

I	II	III	IV	V
263	283	272	263	10
263	547	379	263	117
101	601	246	202	45
53	307	127	106	22
53	331	132	106	27
53	367	139	106	34
53	397	145	106	40
53	487	160	159	2

Це видно з табл. 2. Максимальна кількість кроків в представленому методі до отримання результату дорівнюватиме  $\lceil 0,5 N^{0,5} \rceil$ , а мінімальне - один. Це буде значно менше, ніж в будь-якому з широко відомих алгоритмів факторизації.

Виходячи з отриманих результатів можна запропонувати стандартне розпаралелювання процесу факторизації, за допомогою ділення частини числової осі, на якій знаходяться числа, що перевіряються нами. Розмір одержуваних відрізків буде залежати від кількості пристроїв, на яких буде відбуватися процес факторизації. При необмежені можливості під кожне число можна виділити свій процесор, і для вирішення задачі потрібно тільки один крок. Якщо розглянути сумарну кількість кроків при використанні такого методу, то воно буде дорівнює кількості усіх перевірених чисел, тобто використовується метод простого перебору.

Для організації обчислювального процесу необхідно виробити критерій ефективності, на підставі якого можна буде планувати цей процес. Залежно від вирішуваної задачі можна запропонувати кілька варіантів критеріїв. Це може бути мінімізація часу

вирішення задачі при обмеженнях на кількість процесорів або мінімізація процесорів при обмеженні на час вирішення завдання.

У роботі розглядається розпаралелювання задачі факторизації на трьох процесорах. У табл. 3 [11] представлені результати визначення НСД двох чисел, одне з яких дорівнює 29, а друге знаходиться в першому стовпці. У другому і третьому стовпчиках знаходяться числа, що відповідають першому і третьому стовпцям табл. 3, яким відповідає результату факторизації. У четвертому, шостому та восьмому стовпцях поміщені величини НСД, при яких було знайдено рішення. У п'ятому, сьомому і дев'ятому стовпцях знаходяться числа, які визначають кількість кроків, потрібних для знаходження рішення.

Таблиця 3 – Результати розпаралелювання алгоритму факторизації

*1					*2		*3	
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
53	39	1498	29	11	53	3	29	10
61	42	1727	29	14	58	2	61	12
71	45	2014	29	17	58	7	71	8
79	47	2244	29	19	58	10	79	4
89	50	2531	29	22	58	14	87	1
97	53	2760	29	25	58	18	87	5
107	55	3048	29	27	58	21	87	10
113	57	3220	29	29	58	23	87	13
127	60	3623	58	3	58	28	87	19
149	65	4256	58	8	87	6	87	27
157	67	4486	58	10	87	9	29	1
179	72	5119	58	15	87	15	29	9
199	75	5696	58	18	87	21	29	16
211	78	6041	58	21	87	24	29	20
229	81	6560	58	24	87	29	29	26
241	83	6906	58	26	116	3	29	29
257	86	7367	58	29	116	7	29	5
263	87	7540	87	1	116	8	29	7
277	89	7944	87	3	116	11	29	11
293	92	8405	87	6	116	15	29	15

Окремо слід пояснити зміст першого рядка. У ній знаходяться коефіцієнти множення даних чисел. Це означає, що перші п'ять осередків третього рядка працюють з числом  $29 * 53 = 1537$ . Дані в шостий, сьомий осередках цього рядка відповідатимуть числу  $1537*2 = 3074$ , а осередки восьма і дев'ята - числу  $1537*3 = 4611$ . Як видно з табл. 3, у більшості випадків НСД дорівнює 29, або добутку 29 на якесь число (58, 87, 116). Окремо виділяються числа 53, 61, 71, 79, які є другим співмножником числа, що факторизовано. Кількість кроків знаходження рішення в усіх випадках коливається від одного до двадцяти дев'яти. Це досить наочно видно на рис. 1, де представлена залежність розміру кроку визначення НСД від розміру другого співмножника. Слід звернути увагу на те, що в таблиці відсутні деякі з простих чисел на представленому інтервалі. Це пояснюється тим, що їх відсутність не впливає на ілюстрацію роботи запропонованого алгоритму, але значно зменшує розмір таблиці.

На рис. 1 в графічному виді представлені порівняльні розміри інтервалів визначення величини

кроку. Слід зазначити деякі особливості побудови цього графіка. Початок координат по осі X доводиться на координати 30, 115 і 260 для coef.1, 2 і 3 відповідно. Це дозволило будувати графіки з однієї точки. На рисунку видно, що отримані значення добре апроксимуються поліномами другого порядку. Дещо гірше апроксимація відбувається за допомогою прямих. В цьому випадку можна говорити про різних кутах нахилу цих прямих. Відповідно виходять інтервали різної довжини, яка росте при зменшенні кута нахилу розглянутих прямих. Виходячи з отриманих візуальних результатів, можна зробити висновок про можливість розбиття зон знаходження НСД одночасно на різних інтервалах числової осі. Іншими словами, можливості розпаралелювання запропонованого алгоритму.

Проаналізуємо V, VII і IX стовпці табл. 3. Як було сказано вище, в V стовпці знаходяться числа, що відповідають НСД кореня квадратного від добутку простих чисел від 53 на просте число 29 і різниці від цього добутку і квадратного кореня.

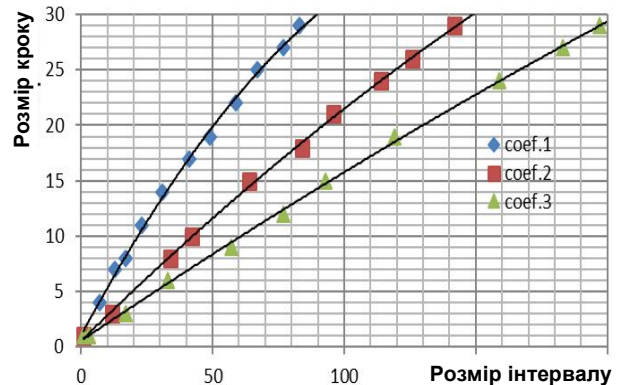


Рис. 1. Порівняльні розміри інтервалів визначення величини кроку

У VII і IX стовпцях отриманий добуток множитья на 2 і 3 відповідно. На рис. 2 під легендою Ряд 1 поміщена гістограма, що відповідає першим 20 значенням величин кроку визначення результату факторизації (стовпець V), Ряд 3 - VII стовпець, Ряд 5 - IX стовпець.

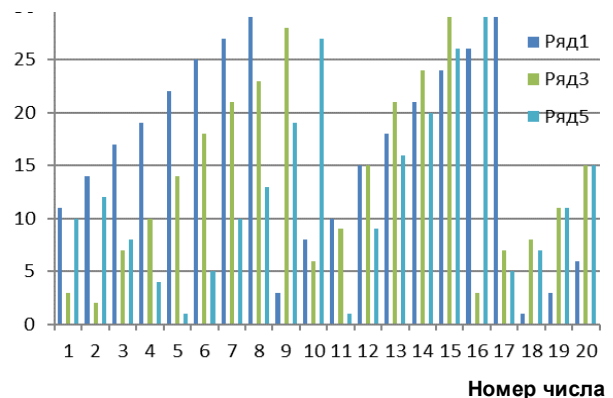


Рис. 2. Залежності величин кроку

На гістограмі добре видно, що в одинадцяти результатах кількість кроків не більше 5, в шістна-

дцяти - не більше 10, і лише в одному випадку кількість кроків більша двадцяти.

Якщо розглянути результати по кожному стовпцю, то п'ятому стовпцю відповідає шість значень не великих 10, сьомому - 9, а дев'ятому - 10. При цьому підрахунку вибирився менший результат з трьох, що відповідає цьому числу. Для наочності виграшу у кількості кроків при розпаралелюванні процесу факторизації чисел побудуємо графік залежності кількості мінімальних кроків від номера числа в табл. 3 (рис. 3). Кількість мінімальних кроків вибиралася як мінімальне серед відповідних чисел в табл. 3 (стовпці V, VII і IX). Отримані дані знаходяться під графіком в другому рядку. У першому рядку знаходиться кількість кроків, відповідне V стовпцю табл. 3. На рисунку вони представлені у вигляді гістограми.

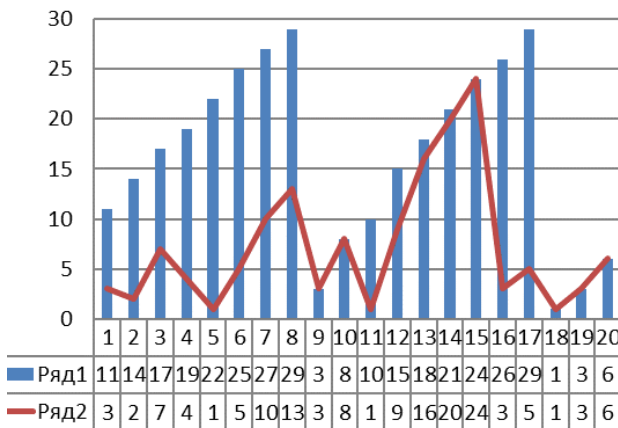


Рис. 3. Мінімальна кількість кроків

Розглянемо алгоритм факторизації, представлений в [11]. Ідея цього алгоритму полягає в складанні нерівності, де аргументом виступає кількість кроків, на яких немає рішення поставленої задачі:

$$j^2 + j(Q - P) + (N - QP) \geq 0,$$

де  $j$  – розмір кроку,  $Q$ ,  $P$  – поточні співмножники,  $N$  – число, що факторизується.

Порівнюємо між собою час роботи алгоритму за рішенням задачі факторизації декількох чисел з різним співвідношенням співмножників (табл. 4).

Таблиця 4 – Порівняльний аналіз часу роботи алгоритму на трьох процесорах

I	II			III	IV
	1	2	3		
15943	4	7	20	4	12
21293	16	2	17	2	6
28141	44	4	4	4	12
33109	56	6	3	3	9
38293	16	3	23	3	9
43657	35	2	18	2	6

У колонці I табл. 4 представлені числа, що факторизовані, в трьох колонках під номером II пред-

ставлена кількість кроків алгоритму, необхідних для вирішення задачі. У колонці III представлена мінімальна кількість кроків, необхідна для вирішення задачі при використанні трьох процесорів. У колонці IV представлена сумарна кількість кроків, необхідна для вирішення задачі при використанні трьох процесорів. Розглянемо деякі особливості представлених результатів в табл. 4. У колонці II знаходяться три стовпчики. Це номери процесорів, які працюють з числами, рівними числу, вказаному в колонці I, помноженому на номер відповідного процесора. Таким чином перший процесор виконував факторизацію числа 15943, другий - числа 15943\*2, третій - 15943\*3.

Що лежить в основі запропонованого методу розпаралелювання? Більшість методів факторизації в своїй основі мають метод Ферма, який якимось чином модифікується [1,n2]. У запропонованому варіанті розпаралелювання проводиться спроба змінити відстань між числами на числової осі. Якщо число 15943 = 107 \* 149, то на другому процесорі факторизується число 31886 = 214 \* 149. В даному випадку відстань між числами збільшується, і це відображено в табл.4 у вигляді збільшення кількості кроків на другому і третьому процесорах.

## Висновки

У роботі розглядаються підходи до розпаралелювання задачі факторизації, які застосовуються в сучасних обчислювальних системах. Пропонуються критерії ефективності, на підставі яких можна висувати вимоги до способів побудови і організації обчислювального процесу паралельною системою. Пропонована технологія розпаралелювання процесу факторизації ґрунтується на можливості зменшення відстані між співмножниками на числовій осі. Це досягається шляхом множення числа, що факторизується, на невеликі співмножники, які враховуватимуться при остаточному рішенні задачі. Представлений і проаналізований алгоритм факторизації, який здійснює пошук не співмножників, а доданків, що дозволяє швидко вирішувати задачу факторизації як при близьких співмножниках, так і при тих, що значно відрізняються один від одного. Алгоритм факторизації, що розглядається в статті, ґрунтований на рішенні нерівності, дозволяє відсікати велику кількість варіантів співмножників, які не є рішенням поставленої задачі. Розглянута в роботі можливість використання запропонованих алгоритмів на трьох процесорах. Проведений експеримент підтверджує гіпотезу про можливість збільшення швидкості рішення задачі факторизації збільшенням розміру числа, яке треба факторизувати. Результати експериментальних досліджень проілюстровані діаграмами, на яких наочно показаний виграш в часі при використанні запропонованої технології.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Василенко О. Н. Теоретико-числові алгоритми в криптографії. М.: МЦНМО, 2003. 328 с.
2. Ишмухаметов Ш. Т. Методы факторизации натуральных чисел. Казань : Казан. ун-т, 2011, 190 с.
3. Shor P. W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer // Foundations of Computer Science : Conference Publications. 1997. P.1484–1509.

4. Manikandan V, Porkodi V, Mohammed AS, Sivaram M, "Privacy Preserving Data Mining Using Threshold Based Fuzzy cmeans Clustering", ICTACT Journal on Soft Computing, Volume 9, Issue 1, 2018, pp.1813-1816. DOI: [10.21917/ijsc.2018.0252](https://doi.org/10.21917/ijsc.2018.0252)
5. Porkodi V., Sivaram M., Mohammed A.S., Manikandan V. Survey on White-Box Attacks and Solutions. Asian Journal of Computer Science and Technology. Vol. 7, Is. 3. pp. 28–32.
6. Amin Salih Mohammed, Saravana Balaji B., Hiwa Abdulkarim Mawlood. Conceptual analysis of Iris Recognition Systems. Advanced Information Systems. 2019. Vol. 3, No. 2. P. 86-90. DOI : <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.15>
7. Saravanan S., Hailu M., Gouse G.M., Lavanya M., Vijaysai R. Optimized Secure Scan Flip Flop to Thwart Side Channel Attack in Crypto-Chip. *International Conference on Advances of Science and Technology*, ICAST 2018. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Vol 274. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15357-1\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15357-1_34)
8. Pevnev V. Pseudoprime Numbers: Basic Concepts And The Problem Of Security, 13th International Conference on Information and Communication Technology (ICT) in Education Research and Industrial Applications, 2017. P. 583-593.
9. Solovay R., V. Strassen. A fast Monte-carlo test for primality. In: SIAM J. Comput., V. 6, 1977. P.84-85.
10. Pevnev V. Investigation of the algorithm for the numbers primality determining Publication Year: 2018, P. 243 – 247
11. Певнев В. Я., Логвиненко Н.Ф., Шостак А.В. Алгоритм факторизации на основе решения квадратного неравенства Системи обробки інформації. 2001. №.3(13). С.13-16.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,  
Національний технічний університет «ХПІ», Харків  
Received (Надійшла) 20.06.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.08.2019

### Технология построения параллельных алгоритмов факторизации

В. С. Харченко, В. Я. Певнев

Предметом изучения статьи являются алгоритмы факторизации больших чисел. Целью статьи является разработка технологии распараллеливания процесса факторизации и ее экспериментальное исследование. Задачи: повысить быстродействие предлагаемых алгоритмов за счет распараллеливания процесса факторизации больших чисел. Рассматриваются подходы для распараллеливания задачи факторизации, которые применяются в современных системах. Предлагаются критерии эффективности, на основании которых можно выдвигать требования к способам построения и организации вычислительного процесса параллельной системой. Предлагаемая технология основывается на возможности уменьшения расстояния между множителями на числовой оси. Это достигается путем умножения факторизуемого числа на небольшие сомножители, которые будут учитываться при окончательном решении задачи. Представлен и проанализирован алгоритм факторизации, который производит поиск не сомножителей, а слагаемых, что позволяет быстро решать задачу факторизации как при близких сомножителях, так и при значительно отличающихся друг от друга. Рассмотрена возможность использования предложенного алгоритма на трех процессорах. Проведенный эксперимент подтверждает гипотезу о возможности увеличения скорости решения задачи факторизации путем увеличения размера факторизуемого числа. Результаты экспериментальных исследований проиллюстрированы рисунками, на которых наглядно показан выигрыш во времени при использовании предложенной технологии. Рассматриваемый в статье алгоритм факторизации, основанный на решении неравенства, позволяет отсекалть большое количество вариантов сомножителей, которые не являются решением поставленной задачи. Проведенные экспериментальные исследования на трехпроцессорной системе показали хорошие результаты решения задачи факторизации с использованием возможного распараллеливания этого процесса. Проведенные исследования по распараллеливанию задачи факторизации имеют большое значение как в теоретической плоскости, так и практическое значение при использовании систем шифрования с открытым ключом.

**Ключевые слова:** алгоритмы факторизации, технология распараллеливания, наибольший общий делитель, алгоритм квадратичного решета.

### Technology of construction of parallel algorithms of factorization

V. Kharchenko, V. Pevnev

The subject of study of the article are algorithms for factoring large numbers. The aim of the article is to develop a technology for parallelization of the factorization process and its experimental research. Tasks: to increase the speed of the proposed algorithms by parallelizing the process of factoring large numbers. The approaches for parallelization of the factorization problem, which are used in modern systems, are considered. Efficiency criteria are proposed, on the basis of which it is possible to put forward requirements for the methods of constructing and organizing the computational process by a parallel system. The proposed technology is based on the possibility of reducing the distance between the factors on the numerical axis. This is achieved by multiplying the factoring number by small factors, which will be taken into account in the final solution of the problem. The factorization algorithm is presented and analyzed, which searches for non-factors, and terms, which allows you to quickly solve the factorization problem, both with close factors, and with significantly different from each other. The possibility of using the proposed algorithm on three processors is considered. The experiment confirms the hypothesis about the possibility of increasing the speed of solving the factorization problem by increasing the size of the factoring number. The results of experimental studies are illustrated by drawings, which clearly show the time gain when using the proposed technology. The factorization algorithm considered in the article, based on the solution of inequality, makes it possible to cut off a large number of variants of factors that are not the solution of the problem. Experimental studies conducted on a three-processor system have shown good results in solving the factorization problem using the possible parallelization of this process. The conducted studies on parallelization of the factorization task are of great importance both in the theoretical plane and also of practical importance when using public key encryption systems.

**Keywords:** factorization algorithms, paralleling technology, the greatest common divisor, quadratic sieve algorithm.



С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ДОПОВНЕННЯ ВХІДНИХ ДАНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ В СИТУАЦІЇ ЦИКЛІЧНОГО ХОЛОДНОГО СТАРТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕМПОРАЛЬНИХ ОБМЕЖЕНЬ ТИПУ «NEXT»

**Предметом** вивчення в статті є процеси формування рекомендованого списку товарів та послуг в ситуації циклічного холодного старту рекомендаційної системи. Така ситуація характеризується циклічною зміною інтересів користувачів, що потребує уточнення вхідних даних для побудови рекомендацій. **Метою** є розробка методу доповнення вхідних даних для побудови рекомендацій непостійним користувачам, що змінюють свої вимоги, з використанням темпоральних обмежень типу «Next». **Завдання:** виділити базові особливості темпоральних залежностей в рекомендаційних системах; розробити концепцію коригування вхідних даних на основі темпоральних обмежень типу «Next». Отримані наступні **результати.** Виконано структурування темпоральних залежностей з урахуванням особливості їх застосування в рекомендаційних системах. Показано, що для опису поведінки користувача в таких системах можна використовувати залежності типу «Next» між послідовним у часі вибором одного й того ж об'єкту, а також залежності типу «Future» з проміжним вибором інших товарів або послуг. Запропоновано концептуальний підхід до уточнення вхідних даних на основі темпоральних залежностей. В рамках представленого концептуального підходу запропоновано метод доповнення рекомендаційної системи на основі формування темпоральних обмежень типу «Next». **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано метод доповнення вхідних даних рекомендаційної системи в ситуації циклічного холодного старту з використанням темпоральних обмежень типу «Next». Метод містить етапи узагальнення вхідних даних, формування темпоральних обмежень типу «Next», а також доповнення вхідних даних згідно отриманих обмежень. Запропонований метод дозволяє підвищити ефективність побудови рекомендацій для непостійних користувачів на основі формування обмежень, що відображають обов'язкові зміни інтересів відомих користувачів.

**Ключові слова:** рекомендаційні системи, темпоральні обмеження, персоналізація рекомендацій, формування рекомендацій.

### Вступ

Рекомендаційні системи призначені для підтримки вибору споживача із множини запропонованих товарів та послуг в Інтернет - магазинах, системах заказу туристичних турів та готелів, системах продажу послуг з перегляду відео, тощо [1 – 3]. Алгоритми роботи рекомендаційних систем дають можливість прогнозувати набір товарів або послуг, що відповідають потребам конкретного споживача. Рекомендаційні системи при формуванні пропозицій користувачеві використовують дані про вибір схожих споживачів, а також про схожість характеристик запропонованих предметів та тих, що були вибрані споживачем раніше [4, 5].

Однією з ключових проблем, що виникає при побудові та удосконаленні рекомендаційних систем, є проблема холодного старту. Остання виникає в ситуації неповноти даних про вибір товарів та послуг новими споживачами [6]. При появі нового користувача рекомендаційної системи або нового товару чи послуги вони розглядаються як «холодні», тому що рекомендаційна система не має достатньо інформації для формування релевантних пропозицій новим користувачам або рекомендацій щодо нових товарів та послуг.

Для формування рекомендацій необхідно, щоб користувач вибрав деякий набір товарів та послуг за власною ініціативою.

Після вибору користувачі перестають розглядатись «холодні» і тому рекомендації для них мо-

жуть бути сформовані за допомогою відомих алгоритмів.

Проблема холодного старту виникає не лише для нових, але й для нерегулярних користувачів. Останні заходять на відповідний сайт електронної комерції через великі інтервали часу. Така поведінка зазвичай характерна для споживачів, що купують дорогу побутову техніку, туристичні подорожі, тощо [7].

Фактично дана ситуація є проміжною між традиційним холодним стартом та поведінкою постійного споживача. Знання про залежності між вибором споживачів в даному випадку є неявними і вони не в повному обсязі відображені в рекомендаційній системі, що значно утруднює формування персоналізованих рекомендацій.

Традиційно при вирішенні проблеми холодного старту виконується аналіз контексту [8] вхідних даних, після чого виконується колаборативна фільтрація [9].

При аналізі контексту враховуються також характеристики поведінки користувачів. Останні можуть бути побудовані з використанням градієнтного спуску [10], та представлені у вигляді темпорального графу [11] або нейромережевої моделі [12]. Моделювання поведінки користувача передбачає використання повного масиву вхідних даних, що підвищує обчислювальні витрати. Однак такі підходи мають досить високу точність.

Альтернативні підходи пов'язані із фільтрацією вхідних даних, під час якої видаляється нереле-

вантна для поточної рекомендації інформація. Таке коригування масиву вхідних даних виконується на основі багатопланового графового представлення поведінки користувача [13], а також на основі самонавчання [14] та активного навчання [15].

Ключова перевага останньої групи підходів полягає в тому, що вони є доповненням до традиційних методів побудови рекомендацій у випадку вирішення проблеми холодного старту. Однак в цілому існуючі підходи до вирішення проблеми холодного старту не враховують притаманне циклічному холодному старту поєднання змін у інтересах споживачів та неповноту інформації про вибір цих споживачів, що і свідчить про актуальність даної проблеми.

Слід зазначити, що моделі таких неявних залежностей у їх темпоральному аспекті можуть бути побудовані шляхом аналізу послідовностей вибору користувачів [16].

Відповідно, для вирішення розглянутої проблеми доцільно доповнити вхідні дані нерегулярних користувачів з використанням сформованих темпоральних обмежень циклу вибору товарів та послуг для уже відомих споживачів. Це дасть можливість в подальшому використовувати традиційні методи для формування пропозицій в ситуації циклічного холодного старту.

**Метою статті є** розробка методу доповнення вхідних даних для побудови рекомендацій непостійним користувачам, що змінюють свої вимоги, з використанням темпоральних обмежень.

Даний метод має забезпечити можливість побудови рекомендацій для нерегулярних користувачів, інтереси яких змінюються з часом.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

- виділити базові особливості темпоральних залежностей в рекомендаційних системах;
- розробити концепцію коригування вхідних даних у ситуації циклічного холодного старту;
- розробити метод доповнення вхідних даних на основі темпоральних обмежень типу «Next».

### **Структуризація особливостей темпоральних залежностей**

Темпоральні залежності згідно результатів робіт [17, 18] представляються темпоральними правилами, що пов'язують пари подій з однієї послідовності подій. Адаптація цих темпоральних залежностей для задачі побудови рекомендацій дає можливість визначити темпоральні правила як зв'язки у часі між подіями вибору визначеної підмножини товарів та послуг для заданої підмножини користувачів. Такі залежності визначають типові зміни поведінки споживачів з часом і тому можуть бути використані для визначення обмежень у поведінці нерегулярних користувачів рекомендаційної системи.

Побудова рекомендацій в цілому направлена на звуження можливостей вибору користувача таким чином, щоб спростити його вибір, найкраще задовольнивши його інтереси. Такі інтереси пред-

ставлені відомою множиною вибраних цим користувачем товарів та послуг. У випадку циклічного холодного старту минулий вибір користувача вже не є актуальним. Однак він може коригуватись із відомим вибором інших користувачів на даному інтервалі часу, наприклад, із сезонним вибором товарів, подорожей, вибором популярних в даний момент співаків, фільмів, тощо.

Тому задача побудови рекомендацій в даній ситуації направлена на звуження можливостей вибору нерегулярного користувача на основі темпоральних обмежень, які задаються вибором інших користувачів.

Для вирішення цієї задачі пропонується доповнити вхідні дані для нерегулярного користувача записами обмежень по вибраній підмножині користувачів на заданому інтервалі часу.

Такі темпоральні обмеження можуть бути задані за допомогою темпоральних операторів X (Next) та F (Future) [17]. Перший з них задає зв'язок між двома послідовними виборами споживача.

Такий зв'язок з урахуванням особливостей використання рекомендаційних систем може бути інтерпретований в двох аспектах:

- послідовний у часі вибір одного й того ж об'єкту (товару, послуги) різними споживачами;
- послідовний вибір одним споживачем (або визначеною групою схожих споживачів) різних товарів та послуг.

В першому випадку темпоральне правило типу «Next» визначає послідовність зміни інтересу споживачів до визначеної групи товарів та послуг. Така зміна інтересів задається на парі послідовних інтервалів часу.

В другому випадку дане темпоральне правило визначає послідовність зміни інтересів вибраної групи споживачів. Зазначена група може бути відібрана за рядом ознак (вік, місце проживання, освіта, тощо).

Темпоральні правила типу Future відрізняються тим, що вони задають зв'язок між довільною парою виборів користувачів, між якими було здійснено інший вибір. Тобто такі правила визначають зміну інтересів користувачів для значних інтервалів часу.

Комбінація вказаних правил дозволяє моделювати динамічний аспект інтересів споживачів.

### **Концепція коригування вхідних даних у ситуації циклічного холодного старту**

Ключова ідея запропонованого підходу полягає у використанні темпоральних моделей поведінки відомих споживачів для доповнення вхідних даних нерегулярних користувачів рекомендаційної системи. Це дає можливість побудувати перелік пропозицій товарів та послуг у разі відсутності або неактуальності вхідних даних щодо вибору поточного користувача рекомендаційної системи у разі зміни його інтересів протягом тривалого періоду часу.

Узагальнену схему запропонованої концепції представлено на рис. 1.



Рис. 1. Концептуальна схема коригування даних у ситуації циклічного холодного старту

Представлена на даному рисунку послідовність містить такі дві ключові фази:

- видалення нерелевантної інформації;
- доповнення інформації на основі темпоральних обмежень.

Видалення нерелевантної інформації дає можливість не лише підвищити точність рекомендацій, але й понизити обчислювальні витрати на їх побудову. Останнє є особливо важливим у випадку формування рекомендованого переліку товарів та послуг у режимі он-лайн.

Доповнення вхідних даних задає «коридор вибору» для користувача. Як уже було зазначено вище, такий «коридор вибору» визначається допустимою поведінкою (в сенсі послідовності виборів) споживачів.

Поведінка споживача може бути представлена темпоральними правилами та темпоральними обмеженнями. Відмінність обмежень від темпоральних правил полягає в тому, що вони виконуються на всій визначеній послідовності інтервалів часу.

Таким чином, згідно запропонованої концепції при реалізації обох розглянутих фаз виконується побудова темпоральних залежностей та їх подальше використання для коригування вхідних даних.

На першій фазі формуються темпоральні правила, які дають можливість із заданим рівнем ймовірності відібрати вхідні дані.

На другій фазі формуються темпоральні обмеження, які задають обов'язкові зміни поведінки для визначеного інтервалу часу. Ці обмеження визначають мінімальний набір покупок, який був виконаний споживачами. Тому вказаний набір використовується в якості вхідних даних для нерегулярного споживача.

### Метод доповнення вхідних даних рекомендаційної системи в ситуації циклічного холодного старту

Вхідними даними методу є:

- журнал (лог) продажів товарів та послуг;
- інтервал часу  $[\tau_1, \tau_N]$  для відбору даних, що відповідають актуальним змінам поведінки користувачів;
- рівень деталізації часу, тобто рівень базових інтервалів часу  $\Delta\tau$ , відносно яких формуються темпоральні залежності (година, день, тиждень, тощо).

Журнал продажів має наступну структуру:

$$L = \{l_m\}, \quad (1)$$

$$l_m = (i_j, u_k, \tau_m, p_m),$$

де  $u_k$  – користувач рекомендаційної системи;

$i_j$  – об'єкт (товар або послуга), який вибрав користувач;

$\tau_m$  – момент часу вибору користувача;

$p_m$  – кількість одиниць вибраних об'єктів.

Метод містить у собі такі етапи.

**Етап 1.** Відбір підмножини записів із журналу  $L$  для заданого інтервалу часу:

$$L^* = \{l_m : \tau_m \in [\tau_1, \tau_N]\}, \quad (2)$$

$$L^* \subseteq L.$$

**Етап 2.** Поєднання покупок  $l_m$  для заданого рівня деталізації часу  $\Delta\tau$  та заданого об'єкту  $i_j$  у множини  $l_r^{**}$ :

$$L^{**} = \{l_r^{**}\}, \quad (3)$$

$$l_r^{**} = (p_r, i_j, \Delta\tau_r) : \tau_m \in \Delta\tau_r,$$

де  $p_r$  – кількість вибраних (куплених) одиниць товару на заданому  $s$  – інтервалі часу (для заданого рівня деталізації)  $\Delta\tau_r$ .

Значення  $p_r$  з урахуванням умови  $\tau_m \in \Delta\tau_r$  у виразі (3) обраховується традиційно:

$$p_r = \sum_{i_j \in l_m} p_m. \quad (4)$$

**Еман 3.** Формування обмежень

$$C^{Next} = \{c_{j,r}^{Next}\}$$

типу «Next» для пар послідовних інтервалів  $\Delta\tau_r$ :

$$c_{j,r}^{Next} = l_r^{**} X l_{r+1}^{**} : i_j \in l_r^{**}, i_j \in l_{r+1}^{**} \Rightarrow \exists c_{j,r}^{Next}, \quad (5)$$

де  $c_{j,r}^{Next}$  – обмеження по вибору об'єкту  $i_j$  на послідовних інтервалах часу  $\Delta\tau_r$ ,  $\Delta\tau_{r+1}$ .

**Еман 4.** Доповнення вхідних даних  $L$  для неперіодичного користувача парами  $l_r^{**}, l_{r+1}^{**}$ , що відображають обов'язкові для інтервалу  $[\tau_1, \tau_N]$  зміни вподобань споживачів.

Відзначимо, що у загальному випадку значення  $p_r$  для цих нових записів вхідних даних може бути встановлено рівним 1, щоб мінімізувати вплив поєднання покупок на етапі 2 методу.

**Висновки**

Розглянуто проблему побудови рекомендацій неперіодичним користувачам у випадку циклічного холодного старту.

Останній характеризується циклічною зміною інтересів таких користувачів, що потребує уточ-

нення вхідних даних. Для вирішення цієї проблеми запропоновано реалізувати уточнення вхідних даних з урахуванням темпоральних аспектів вибору вже відомих користувачів.

Виконано структурування темпоральних залежностей.

Показано, що для опису поведінки користувача в рекомендаційних системах можна використовувати залежності між послідовним у часі вибором одного й того ж об'єкту, а також вибором на інтервалах часу, між якими є проміжний вибір інших товарів або послуг.

Запропоновано концептуальний підхід до уточнення вхідних даних на основі темпоральних залежностей.

На основі представленого концептуального підходу запропоновано метод доповнення вхідних даних рекомендаційної системи в ситуації циклічного холодного старту з використанням темпоральних обмежень типу «Next».

Метод містить етапи узагальнення вхідних даних, формування темпоральних обмежень типу «Next», а також доповнення вхідних даних згідно отриманих обмежень.

Запропонований метод дозволяє підвищити ефективність формування рекомендацій для неперіодичних користувачів з урахуванням змін інтересів відомих споживачів.

## REFERENCES

- Linden G., Smith B. and York J. (2003), "Amazon.com recommendations: Item-to-item collaborative filtering", *Internet Computing*, IEEE 7, 1, pp. 76–80.
- Jannach D., Gedikli F., Karakaya Z., Juwig O. (2012) Recommending Hotels based on Multi-Dimensional Customer Ratings. In: Fuchs M., Ricci F., Cantoni L. (eds) *Information and Communication Technologies in Tourism 2012*. Springer, Vienna, pp 320-331.
- Bennet J. and Lanning S. (2007) "The Netflix Prize", *Proceedings of KDD cup and workshop*, available at: <http://www.netflixprize.com> (last accessed May 31, 2019).
- Aggarwal C. (2017). *Recommender Systems: The Textbook*, New York: Springer. 498 p.
- Adomavicius G. and Tuzhilin A. (2005), "Towards the Next Generation of Recommender Systems" A Survey of the State-of-the-Art and Possible Extensions, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, No. 17, pp. 634–749.
- Son Le Hoang (2016). Dealing with the new user cold-start problem in recommender systems: A comparative review. *Information Systems*, 58, 87-104.
- Bernardi L., Kamps J., Kiseleva J., Müller M. (2015). The Continuous Cold Start Problem in e-Commerce Recommender Systems. *CoRR abs/1508.01177*.
- Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. (2018). Моделювання контексту в рекомендаційних системах. *Проблеми інформаційних технологій*, 1(023), 21-26.
- Braunhofer M. (2014). Hybrid Solution of the Cold-Start Problem in Context-Aware Recommender Systems. *UMAP 2014: User Modeling, Adaptation, and Personalization*, 484-489.
- Koren, Y. (2009). Collaborative Filtering with Temporal Dynamics. *ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 447-456.
- Xiang L., Yuan Q. (2010). Temporal Recommendation on Graphs via Long-and Short-term Preference Fusion. *KDD'10 of the 16th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 723-732.
- Elahi M., Ricci F., Rubens N. (2016). A survey of active learning in collaborative filtering recommender systems. *Computer Science Review*, 20, 29-50.
- Chalyi S., Pribylnova I. (2019). The method of constructing recommendations online on the temporal dynamics of user interests using multilayer graph. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 13-19.
- Luo C., Cai X. (2014). Self-training Temporal Dynamics Collaborative Filtering. *PAKDD'14*, 461-472.
- Zhu Y., Lin J., He S., Wang B., Guan Z., Liu H., and Cai D. (2018). Addressing the item cold-start problem by attribute-driven active learning." *arXiv preprint arXiv:1805.09023*.
- Kalynychenko O., Chalyi S., Bodyanskiy Y., Golian V., Golian N. (2013). Implementation of search mechanism for implicit dependences in process mining. *2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced*

- Computing Systems (IDAACS). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/IDAACS.2013.6662657
17. Levykin V., Chala O. (2018). Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/3(95), 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142664.
18. Levykin V., Chala O. (2018). Method of determining weights of temporal rules in markov logic network for building knowledge base in information control system. EUREKA: Physics and Engineering, 5(18), 3-10.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г. А. Кучук,  
 Національний технічний університет «ХПІ», Харків  
 Received (Надійшла) 27.06.2019  
 Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

**Дополнение входных данных рекомендательной системы  
 в ситуации циклического холодного старта  
 с использованием темпоральных ограничений типа «Next»**

С. Ф. Чалый, В. А. Лещинский, И. А. Лещинская

**Предметом** изучения в статье являются процессы формирования рекомендованного списка товаров и услуг в ситуации циклического холодного старта рекомендательной системы. Такая ситуация характеризуется циклической сменой интересов пользователей, что требует уточнения исходных данных при построении рекомендаций. **Целью** является разработка метода дополнения входных данных для построения рекомендаций непостоянным пользователям, которые меняют свои требования, с использованием темпоральных ограничений типа «Next». **Задачи:** выделить базовые особенности темпоральных зависимостей в рекомендательных системах; разработать концепцию корректировки входных данных в ситуации циклического холодного старта; разработать метод дополнения входных данных на основе темпоральных ограничений типа «Next». Получены следующие **результаты**. Выполнена структуризация темпоральных зависимостей с учетом особенности их применения в рекомендательных системах. Показано, что для описания поведения пользователя в таких системах можно использовать зависимости типа «Next» между последовательным во времени выбором одного и того же объекта, а также зависимости типа «Future» с промежуточным выбором других товаров или услуг. Предложен концептуальный подход к уточнению входных данных на основе темпоральных зависимостей. В рамках представленного концептуального подхода предложен метод дополнения входных данных рекомендательной системы на основе формирования темпоральных ограничений типа «Next». **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем. Предложен метод дополнения входных данных рекомендательной системы в ситуации циклического холодного старта с использованием темпоральных ограничений типа «Next». Метод включает этапы обобщения исходных данных, формирования темпоральных ограничений типа «Next», а также дополнения входных данных согласно полученным ограничениям. Предложенный метод позволяет повысить эффективность построения рекомендаций для непостоянных пользователей на основе формирования ограничений, отражающие обязательные изменения интересов известных пользователей.

**Ключевые слова:** рекомендательные системы, темпоральные ограничения, персонализация рекомендаций, формирование рекомендаций.

**Supplementing the input of the recommendation system  
 in a cyclic cold start situation  
 using temporal constraints of the “next” type**

S. Chalyi, V. Leshchynskiy, I. Leshchynska

The **subject matter** of the article is the formation of the recommended list of goods and services in a situation of a cyclical cold start of the recommendation system. This situation is characterized by a cyclical change in the interests of users, which requires clarification of the source data when building recommendations. The goal is to develop a method of supplementing the input data to build recommendations for non-permanent users who change their requirements, using temporal constraints such as “Next”. **Tasks:** to highlight the basic features of temporal dependencies in recommendation systems; to develop the concept of adding input data in a situation of cyclic cold start; to develop a method for supplementing input data based on temporal constraints of the “Next” type. The following **results** are obtained. The temporal dependencies are structured taking into account the features of their application in recommender systems. It is shown that to describe user behavior in such systems, you can use dependencies of the “Next” type between time-consistent selection of the same object, as well as dependencies of the “Future” type with an intermediate choice of other goods or services. A conceptual approach to refine the input data based on temporal dependencies is proposed. Within the framework of the presented conceptual approach, a method is proposed for supplementing the input data of the recommendation system based on the formation of temporal constraints of the “Next” type. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is as follows. A method is proposed for supplementing the input data of a recommender system in a cyclic cold start situation using temporal constraints of the “Next” type. The method includes the steps of summarizing the initial data, forming temporal constraints of the “Next” type, and also supplementing the input data according to the obtained constraints. The proposed method allows to increase the efficiency of constructing recommendations for non-regular users based on the formation of restrictions that reflect mandatory changes in the interests of known users.

**Keywords:** recommendation systems, temporal restrictions, personalization of recommendations, formation of recommendations.

Д. В. Шингалов, Є. В. Мелешко, В. В. Босько

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДКРИТИХ НАБОРІВ ДАНИХ ВЕБ-РЕСУРСІВ У КОНТЕКСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЇХ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ

**Предметом** вивчення у статті є процес тестування методів побудови рекомендаційних систем на основі відкритих наборів даних у мережі Інтернет. **Метою** є дослідження відкритих наборів даних веб-ресурсів у контексті застосування їх для тестування різних методів побудови рекомендаційних систем. **Завдання:** дослідити сучасні веб-платформи з відкритими наборами даних та можливість застосування їх даних для тестування якості роботи різних рекомендаційних систем. Отримані такі **результати:** Розглянуто найбільш популярні веб-платформи з відкритими наборами різномісних мережевих даних. Здійснено порівняльний аналіз цих платформ з точки зору наявності вільного доступу до завантаження даних, їх функціональності та територіальної приналежності, формату даних та зручності для подальшого використання для машинного навчання, а також можливості застосування для тестування рекомендаційних систем. Також проведено оцінку актуальності даних, що зберігаються у репозиторіях з вільним доступом та наявності їх оновлення з часом. **Висновки.** Досліджено веб-платформи, що містять відкриті набори даних, які можна використати для тестування рекомендаційних систем. Основними перевагами більшості платформ є підтримка сучасних форматів даних та умовно вільний або вільний доступ. Серед недоліків розглянутих платформ слід зазначити недостатню структурованість деяких наборів даних, зокрема текстових, що значно обмежує їх застосування для тестування методів контентної фільтрації. Окрім того, одним з факторів, що обмежує використання відкритих наборів даних є їхня актуальність, тому що деякі набори, що зберігаються на платформах, є застарілими та не оновлюються. Усі розглянуті набори даних можуть бути застосовані для дослідницьких цілей та тестування роботи рекомендаційних систем.

**Ключові слова:** рекомендаційні системи, тестування, аналіз даних, відкриті набори даних, цифровий маркетинг.

### Вступ

Рекомендаційні системи стають одним з найважливіших інструментів для маркетингу товарів та послуг в мережі Інтернет. Кількість інформації збільшується щодня, що призводить до перевантаження даними користувачів мережі. Визначення вподобаних користувачів для формування ним індивідуальних списків рекомендацій стало одним з рішень даної проблеми

Рекомендаційні системи використовуються для фільтрування та сортування даних на основі вподобань користувачів.

Основною метою рекомендаційних систем є формування корисних пропозицій та рекомендацій з інформації, одержаної про користувачів веб-ресурсу.

Приклади сучасних рекомендаційних систем: рекомендації книг на Amazon, рекомендації фільмів на Netflix, стрічка новин у Facebook, тощо.

Існує багато різних методів побудови рекомендаційних систем, їх можна розділити на три великі категорії [1, 2]:

контентна фільтрація,  
коллаборативна фільтрація,  
гібридні методи.

Кожен з методів побудови рекомендаційних систем має свої переваги, недоліки та обмеження, тому в сучасних системах, як правило, використовуються складні гібриди різних методів контентної та коллаборативної фільтрації [1], а також можуть додаватися різні специфічні методи [1, 3], такі як соціальна фільтрація, контекстна фільтрація, тощо.

Для розробки, навчання та тестування алгоритмів формування списку рекомендацій користувачам, як і для інших алгоритмів машинного навчання, необхідні набори даних, які відповідають певним вимогам, а також є доступними та змістовними.

На сьогоднішній день проблема полягає не в пошуку наборів даних, як було ще 10 років тому, а у підборі коректних та актуальних даних для досліджень. Хороші набори для здійснення наукових досліджень повинні бути цікавими та нетривіальними, відповідати вимогам дослідження: тематика, повнота тощо.

**Метою даної роботи** є дослідження існуючих відкритих наборів різномісних даних для виявлення найбільш придатних з них для використання у рекомендаційних системах.

Поставлена мета реалізується шляхом вирішення наступних задач:

- дослідження характеру, тематики та типу даних у наборах;
- дослідження наявності таких функціональних критеріїв як теги, оцінки та коментарі у наборах даних;
- дослідження територіальної приналежності даних та обмежень доступу для завантаження безпосередньо з джерела.
- дослідження можливості застосування наборів даних з мережі безпосередньо до рекомендаційних систем.

### Основний матеріал

У даній роботі проведено дослідження відкритих наборів даних, які можна використати для нау-

кових проєктів, зокрема, для розробки та тестування рекомендаційних систем.

Тестування рекомендаційних систем – складний та неоднозначний процес, зокрема, й тому, що є різні погляди те, що розуміти під якістю роботи рекомендаційної системи.

Наприклад, користувач системи під якістю роботи буде розуміти здатність системи максимально точно спрогнозувати його вподобання та рекомендувати максимально релевантні його інтересам об'єкти.

В той же час власник системи буде вважати якісною таку рекомендаційну систему, яка буде збільшувати інтерес користувачів до сайту та кількість продажів товарів.

Взагалі існує два різні підходи до тестування рекомендаційних систем:

- offline-тестування системи на готових наборах даних;

- online-тестування системи за допомогою A/B тестування, коли на різних групах користувачів запускаються різні методи, та визначається, який метод дав кращий результат.

Відкриті набори даних, що містять дії користувачів веб-сайтів (наприклад, оцінки, перегляди, покупки, тощо) та, можливо, інформацію про користувачів (наприклад, демографічні дані), дозволяють здійснювати offline-тестування рекомендаційних систем.

Важливим фактором для розробки якісної рекомендаційної системи є можливість використання актуальних наборів даних для аналізу потреб користувачів, а також навчання рекомендаційної системи.

Нижче представлений огляд досліджених веб-ресурсів, що надають вільний доступ до великої кількості наборів відкритих мережових даних.

**MovieLens.** Проєкт науково-дослідної лабораторії кафедри комп'ютерних наук та інженерії в Університеті Мінесоти, що спеціалізується [4]:

- в області рекомендаційних систем,
- інтернет-спільнот,
- мобільних технологій,
- електронних бібліотек,
- локальних і географічних інформаційних систем.

Містить набори даних, одержані в процесі роботи їх веб-сайту з рекомендаційною системою фільмів. Дані надаються усім користувачам на вільній основі.

**Mlvis.** Цей проєкт є першим, що об'єднав поняття сховища даних у реальному часі для візуального та інтерактивного аналізу даних, а також дослідницький аналіз в Інтернеті [5].

Статистичні методи в поєднанні з режимом реального часу для візуалізації даних дають можливість для дослідників легко знайти, вивчити, зрозуміти і відкрити для себе ключові моменти у великій кількості наборів даних.

Цей великий репозиторій даних є корисним для прийняття важливих наукових висновків, а також містить еталонні набори даних для різних до-

датків і областей, включає реляційні таблиці, просторові та часові ряди даних, а також нереляційні дані для машинного навчання.

**Kaggle.** Містить багато малих та середніх наборів даних з різних областей застосування: спорт, соціальні відносини, мобільні додатки, освіта, криптовалюти, тощо для різного роду аналізу даних [6].

**Amazon.** Репозиторій відкритих даних фірми Amazon існує, щоб допомагати людям відкривати і спільно використовувати набори даних, які доступні через ресурси Amazon Web Service [7]. Також сервіс надає можливості для хмарного аналізу даних.

**Reddit.** Надає дуже цікаві набори даних та пояснення до них. Ці набори даних налічують більше ніж терабайт корисних колекцій з можливістю вільного доступу, зокрема містить текстові дані для лінгвістичних досліджень [8].

**Figshare.** Це сховище, в якому користувачі можуть зробити всі свої результати досліджень доступними для суспільства.

Дозволяє користувачам завантажувати будь-який формат файлу, для перегляду в браузері, це будь-які дослідження від плакатів і презентацій до наборів даних і коду, може бути використаний іншими дослідниками [9].

**NodeXLgraphgallery.** Це велика колекція з мережових карт і звітів, створених у NodeXL, де можна знайти [10]:

- графи NodeXL,
- архів наборів даних, завантажених користувачами спільноти NodeXL.

Мережа об'єднує групи дослідників, присвячені створенню відкритих інструментів для аналізу даних і хостингу відкритих даних.

**Yelp.** Веб-сайт для пошуку на місцевому ринку послуг, наприклад, ресторанів або перукарень, з можливістю додавати та переглядати рейтинги та огляди цих послуг.

Підтримує безкоштовний набір даних для використання в особистих, освітніх і наукових цілях [11].

**Networkrepository.** Найбільше мережове сховище з тисячами наборів інтерактивних даних, призначених для візуалізації мережі та інтелектуального аналізу, містить декілька тисяч колекцій реальних мереж: від біологічних до соціальних [12].

**UCI ML.** Позиціонується як репозиторій машинного навчання та містить набори баз даних, які використовуються в машинному навчанні [13]. Спільнота призначена для емпіричного аналізу алгоритмів машинного навчання.

**GitHub.** Великий репозиторій для програмного забезпечення, де окрім програмного коду можна знайти різноманітні набори даних, включаючи дані, отримані з соціальних мереж, додатків тощо [14].

За допомогою інтерфейсу сервісу зручно переглядати оновлення потрібних баз даних.

Порівняльний аналіз розглянутих відкритих наборів даних наведений у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз розглянутих відкритих наборів даних

№	Джерело даних	Види даних	Наявність оцінок користувачів	Наявність тегів	Наявність коментарів	Тип ліцензії	Територіальна приналежність даних	Можливість застосування для тестування рекомендаційних систем	Формати даних
1	movielens.org	фільми	+	+	-	вільна	немає	+	csv
2	mlvis.com	різні	+	+	+	вільна	Європа, США	+	csv
3	kaggle.com	різні	+	+	+	вільна	США	+	csv, SQLite, JSON, BigQuery
4	aws.amazon.com	різні	+	+	-	вільна лише для наукових досліджень	Європа, США	+	csv, JSON
5	reddit.com	різні	+	+	+	вільна лише для наукових досліджень	СНД, Європа, США	+	csv
6	figshare.com	різні	+	+	-	вільна	Європа, США	+	csv, RDS
7	nodexlgraphgallery.org	різні	+	+	+	вільна	немає	+	graph
8	yelp.com	бізнес	+	+	+	вільна	немає	+	JSON
9	networkrepository.com	різні	+	+	+	вільна	немає	+	MTX
10	ics.uci.edu	різні	+	+	-	вільна	немає	+/-	csv, xls
11	github.com	різні	+	+	+	вільна	немає	+	csv, JSON, xls

### Висновки

Досліджені відкриті набори даних містять колекції різних типів, розмірів та охоплюють різну за розмірами аудиторію. Також слід зазначити, що більшість з наборів даних мають вільний доступ до завантаження, інколи при умові, що користувач є зареєстрованим на платформі, але на деяких платформах зазначено, що дані можуть бути використані лише у дослідницьких цілях.

Перевагою переважної більшості програм є великий спектр форматів даних для завантаження, але найбільш популярним форматом для збереження даних є \*.csv.

Крім того вагомим показником є територія, яку охоплюють представлені набори, подекуди вони значно обмежені лише зонами США та Західної Європи.

Зважаючи на всі переваги та недоліки розглянутих програм, можна зробити висновок, що найбільш придатними для застосування у розробці та тестуванні рекомендаційних систем наборами

даних, є набори платформ Reddit, Networkrepository та Github. Дані репозиторії поєднують у собі набори придатні для статистичного та інтелектуального аналізу, мають широкі можливості візуалізації соціальних графів та підтримують більшість сучасних форматів файлів, що є дуже зручною перевагою як для дослідників так і для пересічних користувачів сервісу.

Крім того Github містить багато прикладів застосування конкретних наборів даних, а також інформацію про оновлення версій баз даних у часі, що надає багато можливостей для тестування та удосконалення рекомендаційних систем.

Також заслуговують на увагу такі платформи як Movielens, Mlvis та Kaggle, вони можуть бути досить корисними для тестування рекомендаційних систем, хоч і мають ряд обмежень.

Зокрема, першу платформу обмежено лише одним типом даних, тобто фільмами, останні дві – мають територіальне обмеження, дані зібрані переважно серед жителів США і подекуди не відповідають вітчизняним вимогам.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. "Recommender Systems Handbook" (2010) Editors Francesco Ricci, Lior Rokach, Bracha Shapira, Paul B. Kantor, 1st edition., New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., p. 842.



2. Segaran T. (2008) "Programming Collective Intelligence. Building Smart Web 2.0 Applications", O'Reilly Media, p. 368.
3. Меньшикова Н.В., Портнов И.В., Николаев И.Е. (2016) "Обзор рекомендательных систем и возможностей учета контекста при формировании индивидуальных рекомендаций", АCADEMY, №6, с. 20–22.
4. Harper, F.M. and Konstan J.A. (2016) "The MovieLens Datasets: History and Context", ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS), available at: <https://doi.org/10.1145/2827872>
5. "Scientific data repository. Real-time visualization and exploration techniques interactive visual analytics", available at: <http://mlvis.com/>
6. "Kaggle is the place to do data science projects", available at: <https://www.kaggle.com/datasets>
7. "Registry of Open Data on AWS", available at: <https://registry.opendata.aws/>
8. R/datasets", available at: <https://www.reddit.com/r/datasets>
9. "Online open access repository Figshare", available at: <https://figshare.com/>
10. NodeXL graph gallery", available at: <http://nodexlgraphgallery.org/Pages/Default.aspx>
11. Yelp Open Dataset. An all-purpose dataset for learning", available at: <https://www.yelp.com/dataset>
12. Network repository. A scientific network data repository with interactive visualization and mining tools", available at: <http://networkrepository.com/>
13. UCI Machine Learning Repository. Center for Machine Learning and Intelligent Systems", available at: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.php>
14. Github", available at: <https://github.com/search?q=dataset>

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Received (Надійшла) 14.06.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.07.2019

### Исследование открытых наборов данных веб-ресурсов в контексте применения их для тестирования рекомендательных систем

Д. В. Шингалов, Е. В. Мелешко, В. В. Босько

**Предметом** изучения в статье является процесс тестирования методов построения рекомендательных систем на основе открытых наборов данных в сети Интернет. **Целью** является исследование открытых наборов данных веб-ресурсов в контексте применения их для тестирования различных методов построения рекомендательных систем. **Задачи:** исследовать современные веб-платформы с открытыми наборами данных и возможность применения их данных для тестирования качества работы различных рекомендательных систем. Получены следующие **результаты**. Рассмотрены наиболее популярные веб-платформы с открытыми наборами разнотипных сетевых данных. Осуществлен сравнительный анализ этих платформ с точки зрения наличия свободного доступа к загрузке данных, их функциональности и территориальной принадлежности, формата данных и удобства для дальнейшего использования для машинного обучения, а также возможности применения для тестирования рекомендательных систем. Также проведена оценка актуальности данных, хранящихся в репозиториях со свободным доступом и наличия их обновления со временем. **Выводы.** Исследованы веб-платформы, содержащие открытые наборы данных, которые можно использовать для тестирования рекомендательных систем. Основными преимуществами большинства платформ является поддержка современных форматов данных и условно свободный или свободный доступ. Среди недостатков рассмотренных платформ следует отметить недостаточную структурированность некоторых наборов данных, в частности текстовых, что значительно ограничивает их применение для тестирования методов контентной фильтрации. Кроме того, одним из факторов, который ограничивает использование открытых наборов данных, является их актуальность, так как некоторые наборы, хранящиеся на платформах, устарели и не обновляются. Все рассмотренные наборы данных могут быть применены для исследовательских целей и тестирования работы рекомендательных систем.

**Ключевые слова:** рекомендательные системы, тестирование, анализ данных, открытые наборы данных, цифровой маркетинг.

### Research of open data sets of web resources in the context of their application for testing recommendation systems

D. Shynhalov, Ye. Meleshko, V. Bosko

The **subject matter** of the article is the process of testing methods of building recommender systems based on open data sets from the Internet. The **goal** is to research open data sets of web-resources in the context of using them to test various methods of building recommender systems. The **tasks** to be solved are: to explore modern web-platforms with open data sets and to research the possibility of using their data to test the work quality of various recommender systems. The following **results** were obtained: The most popular web-platforms with open sets of various network data were considered. The comparative analysis of these platforms was carried out in terms of the availability of free access to downloads of data, their functionality and geographical location, data format and convenience for future use for machine learning, as well as the possibility of using for testing recommender systems. Also, an assessment of the relevance of data stored in repositories with free access and their availability over time was made. **Conclusions.** Web-platforms containing open data sets that can be used to test recommender systems were explored. The main advantages of most platforms are the support of modern data formats and conditionally free or free access. Among the shortcomings of the considered platforms, it is worth noting the lack of structuredness of some data sets, in particular, text data, which significantly limits their use for testing content-based filtering methods. In addition, one of the factors that limit the use of open data sets is their relevance, since some of the sets stored on the platforms are outdated and not updated. All considered data sets can be applied for research purposes and for testing the work of recommender systems.

**Keywords:** recommendation systems, testing, data analysis, open data sets, digital marketing.

Т. М. Шипова, Г. М. Зубрицький, В. В. Кірвас

<sup>1</sup> Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## МЕТОД ФОРМУВАННЯ ЕТАЛОННОГО ЗОБРАЖЕННЯ ЯСКРАВОГО ОБ'ЄКТУ

У статті розглянуто завдання формування еталонного зображення для об'єкту, у якого на зображеннях можливі суттєві зміни яскравості. Встановлено, що більшість існуючих методів при великих значеннях відношення сигнал-шум не відповідають вимогам по ймовірності правильного розпізнавання зображення. **Метою статті** є розробка методу формування еталонного зображення яскравого об'єкту, заснованого на виборі його оптимального числового представлення, котре в найбільшій мірі відповідає поточному зображенню. **Результати досліджень.** У представленому методі на кожному етапі порівняння еталонного зображення з фрагментами поточного зображення запропоновано синтезувати оптимальне числове представлення еталонного зображення, що зберігає відношення порядку на його елементах. Для порівняльної оцінки за ймовірністю правильного розпізнавання об'єкта запропонованого і звичайного квадратичного різницевого алгоритмів були проведені статистичні випробування. **Висновок.** При великих значеннях відношення сигнал-шум запропонований алгоритм істотно перевершує стандартний алгоритм по ймовірності правильного розпізнавання зображення.

**Ключові слова:** еталонне зображення, поточне зображення, яскравість, критерій максимальної правдоподібності, відношення лінійного квазіпорядку.

### Вступ

На сьогодні питання розпізнавання зображень займають дуже важливе місце при розробці різних комп'ютерних систем [1-9]. У багатьох наукових роботах розглядаються різноманітні методи [1-4], при цьому в залежності від параметрів зображення якість розпізнавання може суттєво змінюватися при використанні різних методів. Тому у деяких випадках необхідно вирішення окремих завдань, пов'язаних з особливими характеристиками зображення [5-9]. Зокрема, виникає завдання формування еталонного зображення для об'єкту, у якого на зображеннях можливі суттєві зміни яскравості.

Дане завдання розглядалося у деяких роботах [10-19], але при великих значеннях відношення сигнал-шум запропоновані алгоритми не відповідають вимогам по ймовірності правильного розпізнавання зображення.

**Метою цієї статті** є розробка методу формування еталонного зображення яскравого об'єкту, заснованого на виборі його оптимального числового представлення, котре в найбільшій мірі відповідає поточному зображенню.

### Результати досліджень

Нехай поточне зображення задано числовою матрицею, що має розмір  $N_1 \times N_2$ , а еталонне зображення – матрицею  $[e_{ij}]$  розміром  $M_1 \times M_2$ . Нехай також є вірною адитивна модель взаємодії зображення, що надходить, із шумом, тобто для  $(k, l)$ -го фрагменту поточного зображення  $z_{ij} = a_{ij} + n_{ij}$  де  $[a_{ij}^{kl}]$  –  $M_1 \times M_2$  – матриця фрагменту без шуму,  $n_{ij}^{kl}$  – випадкова нормально розподілена величина з нульовим математичним сподіванням і середньоквадратичним відхиленням (СКВ)

$\sigma_{ij}^{kl}$ . Оптимальним за критерієм максимальної правдоподібності є при цьому квадратичний різницевий алгоритм, вирішальна функція якого має такий вигляд:

$$b_{kl} = \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} (z_{ij}^{kl} - e_{ij})^2 / (\sigma_{ij}^{kl})^2, \quad (1)$$

$$k \in \overline{1, N_1 - M_1 + 1}, \quad l \in \overline{1, N_2 - M_2 + 1}.$$

Нехай еталонне зображення (ЕЗ) має зонну структуру в кількості  $N$  зон із вектором яскравостей  $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_N)$ , на елементах еталонне зображення задано відношення лінійного квазіпорядку [1] або на складових вектора  $\pi$  задано відношення лінійного порядку, причому зони пронумеровані в порядку зростання їх яскравостей. Розгорнувши матрицю вирішальної функції, а також ЕЗ і фрагмент поточного зображення по рядках, представимо вираз (1) у вигляді

$$b_k = c_k \sum_{i=1}^M p_i^k (z_i^k - e_i)^2, \quad (2)$$

$$M = M_1 M_2;$$

$$\text{де } p_i^k = 1 / c_k (\sigma_i^k)^2; \quad c_k = \sum_{i=1}^M (\sigma_i^k)^{-2}.$$

Ввівши  $[h_{ij}]$ ,  $(i \in \overline{1, M}, j \in \overline{1, N})$  – матрицю інцидентності, в якій в  $i$ -му рядку на  $j$ -му місці стоїть 1, якщо  $i$ -й елемент ЕЗ належить  $j$ -й зоні та опустивши множник  $c_k$  і номер фрагмента, представимо вираз (2) таким чином:

$$b(\pi) = \sum_{i=1}^M p_i \left( z_i - \sum_{j=1}^N h_{ij} \pi_j \right)^2. \quad (3)$$

Для пошуку оптимального числового представлення ЕЗ необхідно мінімізувати функцію (3) при таких обмеженнях:

$$g_j(\pi) = \pi_j - \pi_{j+1} \leq 0, \quad j \in \overline{1, N-1}. \quad (4)$$

Це завдання належить до типу завдань опуклого програмування, для яких справедлива теорема Куна-Таккера [11], яка стверджує наступне: Нехай функції  $b, g_1, \dots, g_{N-1}$  опуклі і неперервно диференційовані в  $\mathbf{R}^N$ . Припустимо, що вектори  $\pi \in \mathbf{R}^N$  і  $\mu \in \mathbf{R}^{N-1}$  задовольняють умовам:

$$\nabla b(\pi) + \nabla \mathbf{g}(\pi)\mu = 0, \quad (5)$$

$$\mathbf{g}(\pi) \leq 0, \mu \geq 0, \mu_j g_j(\pi) = 0, j \in \overline{1, N-1}. \quad (6)$$

Тоді  $\pi$  є точкою глобального мінімуму задачі, що розглядається.

Система рівнянь (5) та (6) в координатах має такий вигляд:

$$\begin{cases} 2n_1(\pi_1 - \pi'_1) + \mu_1 = 0; \\ 2n_2(\pi_2 - \pi'_2) + \mu_2 - \mu_1 = 0; \\ \dots\dots\dots \\ 2n_{N-1}(\pi_{N-1} - \pi'_{N-1}) + \mu_{N-1} - \mu_{N-2} = 0; \\ 2n_N(\pi_N - \pi'_N) - \mu_{N-1} = 0; \\ \mu_j(\pi_j - \pi_{j+1}) = 0, j \in \overline{1, N-1}, \end{cases} \quad (7)$$

де  $n_i = \sum_{k \in N_i} p_k$ ,  $\pi'_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k \in N_i} p_k y_k$ ,  $N_i$  – множина номерів елементів ЕЗ, що попали до  $i$ -ої зони.

Для вирішення системи (7) будемо використовувати метод послідовного виключення змінних, починаючи з першого рівняння.

У разі відсутності обмежень (за наявності  $\mu = 0$ ) маємо  $\pi = \pi'$ . Тому на першому етапі перевіримо відношення порядку на елементах  $\pi'_1, \pi'_2$ .

Якщо  $\pi'_1 < \pi'_2$ , то і перші два рівняння з системи виключаються.

Нехай на  $i$ -му кроці сталося так, що  $\pi'_i \geq \pi'_{i+1}$ . Назвемо таку ситуацію блоком інверсій. Щоб виконувалася умова  $\pi_i \leq \pi_{i+1}$ , потрібно покласти  $\pi_i = \pi_{i+1}$  і  $\mu_i \geq 0$ .

До цього кроку маємо таке:

$$\mu_1 = \dots = \mu_i = 0,$$

$$\pi_k = \pi'_k \quad (k \in \overline{1, i-1}).$$

З перших двох рівнянь системи знаходимо, що

$$\mu_i = 2n_i(\pi'_i - \pi_{i+1})$$

і маємо рівняння

$$2n'_{i+1}(\pi_{i+1} - \pi''_{i+1}) + \mu_{i+1} = 0,$$

де  $n'_{i+1} = n_i + n_{i+1}$ ,  $\pi''_{i+1} = (n_i \pi'_i + n_{i+1} \pi'_{i+1}) / n'_{i+1}$ .

Таким чином, на цьому етапі виключаються змінні  $\mu_i, \pi_i$ . Далі, якщо

$$\pi''_{i+1} \geq \pi'_{i+2},$$

то вважаємо

$$\pi_{i+1} \geq \pi_{i+2}$$

і знаходимо

$$\mu_{i+1} = 2n'_{i+1}(\pi''_{i+1} - \pi_{i+2}).$$

Нехай на  $(i+1)$ -му кроці виконується умова

$$\pi''_{i+l} < \pi'_{i+l+1},$$

що відповідає закінченню блоку інверсій. Тоді

$$\pi_{i+1} = \dots = \pi_{i+l} = \pi''_{i+l},$$

$$\mu_{i+l} = 0,$$

$$\mu_{i+k} = \frac{2}{n'_{i+l}} \sum_{p=i}^{i+k} \sum_{j=i+k+1}^{i+l} n_p n_j (\pi'_p - \pi'_j), \quad (8)$$

$$k \in \overline{0, l-1},$$

$$n'_{i+k} = \sum_{j=i}^{i+k} n_j,$$

де

$$\pi''_{i+k} = \sum_{j=i}^{i+k} n_j \pi'_j / n'_{i+k}, \quad k \in \overline{0, l-1}.$$

Продовжуючи подібним чином процес вирішення системи (7) з виділенням блоків інверсій, можна вирішити всі рівняння, а з методики її вирішення впливає наведений далі алгоритм вирішення задачі оптимізації.

**Крок 1.** Задати вектори

$$\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_M), \quad p_i > 0, \quad \sum_{i=1}^M p_i = 1;$$

$$\mathbf{z} \in \mathbf{R}^M, \quad \mathbf{r} \in \overline{1, N}^M,$$

де компонента  $r_i$  вектора  $\mathbf{r}$  дорівнює номеру зони, якій належить  $i$ -й елемент ЕЗ.

**Крок 2.** Побудувати матрицю  $\mathbf{H}$  з елементами

$$h_{ij} = \delta_{r_i j},$$

де  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $i \in \overline{1, M}, j \in \overline{1, N}$ .

**Крок 3.** Побудувати множини

$$N_i = \{j \in \overline{1, M} \mid r_j = i\}, \quad i \in \overline{1, N}.$$

**Крок 4.** Побудувати вектори

$$\mathbf{n} \in \mathbf{R}^N, \quad n_i = \sum_{k \in N_i} p_k,$$

$$\pi' \in \mathbf{R}^N, \quad \pi'_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k \in N_i} p_k z_k.$$

**Крок 5.** Покласти  $i = 1$ .

**Крок 6.** Покласти

$$j = 1, \quad l = 1, \quad s_1 = \pi'_i n_i, \quad s_2 = n_i.$$

**Крок 7.** Якщо  $\pi'_j > \pi'_{j+1}$  і  $j \leq N-1$ , то повторювати таку послідовність:

$$s_1 = s_1 + n_{j+1} \pi'_{j+1}, \quad s_2 = s_2 + n_{j+1}, \quad \pi'_k = s_1 / s_2, \\ k \in \overline{j-l+2, j+1}, \quad j := j+1.$$

**Крок 8.** Якщо  $i = 1$ , то покласти  $i := i + 1$ , інакше покласти  $i = j$ .

**Крок 9.** Якщо  $i \leq N-1$ , то перейти до кроку 6.

Для порівняльної оцінки за ймовірністю правильного розпізнавання об'єкта запропонованого і звичайного квадратичного різницевого алгоритмів були проведені статистичні випробування. Моделювалося поточне зображення з такими параметрами:

$$N_1 = N_2 = 16,$$

$$T_2 = 250, \quad T_3 = 260,$$

яке потім зашумлять нормально розподіленим шумом з нульовим середнім значенням і СКО  $\sigma$ . Параметри електронного зображення вибиралися такими:

$$M_1 = M_2 = 4, \quad N = 3,$$

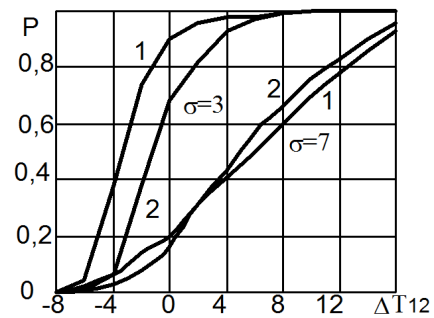
$$E_1 = 240, \quad E_2 = 250, \quad E_3 = 260.$$

Ймовірність правильної локалізації  $P$  оцінювалася кількістю правильно локалізованих випадків до загальної кількості випробувань, яке становило 400. Перед порівнянням зображення (електронне та поточне) були центровані та нормовані.

На рис. 1 наведено залежності ймовірності  $P$  запропонованого (криві 1) та квадратичного різницевого (криві 2) алгоритмів від контрасту

$$\Delta T_{12} = T_2 - T_1$$

для середньоквадратичного відхилення  $\sigma = 3$  або  $\sigma = 7$  при фіксованих інших параметрах поточного та еталонного зображень.



**Рис. 1.** Залежності ймовірності  $P$  запропонованого (криві 1) та квадратичного різницевого (криві 2) алгоритмів від заданого контрасту

При високих рівнях шуму дещо більшою ефективністю володіє звичайний алгоритм, який відрізняється сильною чутливістю до інверсії контрасту, але при малих рівнях шуму запропонований алгоритм істотно перевершує звичайний.

Таким чином, при великих значеннях відношення сигнал-шум запропонований алгоритм істотно перевершує стандартний алгоритм по ймовірності правильного розпізнавання зображення.

## Висновки

У представленому методі на кожному етапі порівняння еталонного зображення з фрагментами поточного зображення запропоновано синтезувати оптимальне числове представлення еталонного зображення, що зберігає відношення порядку на його елементах. Для порівняльної оцінки за ймовірністю правильного розпізнавання об'єкта запропонованого і звичайного квадратичного різницевого алгоритмів були проведені статистичні випробування. При великих значеннях відношення сигнал-шум запропонований алгоритм істотно перевершує стандартний алгоритм по ймовірності правильного розпізнавання зображення.

**Напрямок подальших розвідок** – прив'язка розробленого алгоритму до існуючих комп'ютерних систем, що використовують еталонні зображення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Худов В.Г. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, А.В. Крижний // Системи обробки інформації, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77-80.
- Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. Studies in Systems, Decision and Control, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
- Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
- Кучук Г.А. Минимизация загрузки каналов святы вычислительной сети / Г.А. Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1998. – Вип. 1(5). – С. 149-154.
- Кучук Г.А. Распределение каналов по трактам узла коммутации при адаптивной маршрутизации / Г.А. Кучук // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – № 26. – С. 167 – 172.
- Кучук Г. А. Метод параметрического управления передачей данных для модификации транспортных протоколов беспроводных сетей / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
- Коваленко А.А. Использование временных шкал при аппроксимации длины очередей компьютерных сетей / А.А. Коваленко, Г.А. Кучук, И.В. Рубан // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2018. – № 2 (4). – С. 12–18. – DOI: <http://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.012>
- Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>.

9. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 117–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>
10. Коваленко А. А. Подходы к синтезу информационной структуры системы управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Системы обработки информации. – 2014. – № 1(117). – С. 180-184.
11. Gomathi B, Karthikeyan N K, Saravana Balaji B, “Epsilon-Fuzzy Dominance Sort Based Composite Discrete Artificial Bee Colony optimization for Multi-Objective Cloud Task Scheduling Problem”, *International Journal of Business Intelligence and Data Mining*, Volume 13, Issue 1-3, 2018, pages 247-266, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJBIDM.2018.088435>
12. Yogesh Awasthi, R P Agarwal, B K Sharma, "Intellectual property right protection of browser based software through watermarking technique", *International Journal of Computer Applications*, vol. 97, no. 12, 2014, pp. 32-36.
13. Yogesh Awasthi, R P Agarwal, B K Sharma, "Two Phase Watermarking for Security in Database", *International Journal of Computing*, vol. 4, no. 4, 2014, pp. 821-824
14. Saravana Balaji B, Mohamed Uvaze Ahamed, Eswaran C, Kannan R, “Prediction-based Lossless Image Compression”, *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics (Springer)*, Volume 30, No 1, 2019, pp.1749 – 17961, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00665-5\\_161](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00665-5_161)
15. Sivaram, M., Porkodi, V., Mohammed, A.S., Manikandan V. Detection of Accurate Facial Detection Using Hybrid Deep Convolutional Recurrent Neural Network. *ICTACT Journal on Soft Computing*. 2019. Vol. 09, Issue 02. pp. 1844-1850. DOI: [10.21917/ijsc.2019.0256](https://doi.org/10.21917/ijsc.2019.0256)
16. Sivaram, M., Batri, K., Amin Salih, Mohammed and Porkodi V. (2019), “Exploiting the Local Optima in Genetic Algorithm using Tabu Search”, *Indian Journal of Science and Technology*, Volume 12, Issue 1, 2019. DOI: [10.17485/ijst/2019/v12i1/139577](https://doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i1/139577)
17. Amin Salih Mohammed, Saravana Balaji B., Hiwa Abdulkarim Mawlood. Conceptual analysis of Iris Recognition Systems. *Advanced Information Systems*. 2019. Vol. 3, No. 2. P. 86-90. DOI : <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.15>
18. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study”, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, DOI: [http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201](https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201)
19. Коваленко А. А. Подходы к синтезу технической структуры компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2014. – № 1(38). – С. 116-119.
20. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системы управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НІУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209–213.
21. Yaloveha V., Hlavcheva D., Podorozhniak A. Usage of convolutional neural network for multispectral image processing applied to the problem of detecting fire hazardous forest areas. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, № 1. С. 116–120. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.19>

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. І. В. Рубан,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків  
Received (Надійшла) 16.06.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.07.2019

### Метод формирования эталонного изображения яркого объекта

Т. М. Шипова, Г. Н. Зубрицкий, В. В. Кирвас

В статье рассмотрены задачи формирования эталонного изображения для объекта, у которого на изображениях возможны существенные изменения яркости. Установлено, что большинство существующих методов при больших значениях отношения сигнал-шум не соответствуют требованиям по вероятности правильного распознавания изображения. **Целью статьи** является разработка метода формирования эталонного изображения яркого объекта, основанного на выборе его оптимального численного представления, которое в наибольшей степени соответствует текущему изображению. **Результаты исследований.** В представленном методе на каждом этапе сравнения эталонного изображения с фрагментами текущего изображения предложено синтезировать оптимальное числовое представление эталонного изображения, сохраняет отношение порядка на его элементах. Для сравнительной оценки вероятности правильного распознавания объекта предложенного и обычного квадратичного разностного алгоритмов были проведены статистические испытания. **Вывод.** При больших значениях отношения сигнал-шум предложенный алгоритм существенно превосходит стандартный алгоритм, по всей вероятности правильного распознавания изображения.

**Ключевые слова:** эталонное изображение, текущее изображение, яркость, критерий максимального правдоподобия, отношение линейного квазипорядка.

### The method of forming the reference image of a bright object

T. Shipova, G. Zubritsky, V. Kirvas

In article problems of forming of a standard image for an object are considered. At an object on images brightness variations are possible. The majority of the existing methods do not conform to requirements. At great values of a signal-to-noise ratio. On the probability of the correct recognition of the image. **The purpose of article** is a development of a method of forming of a standard image of a bright object. Which is based on the choice of its optimum numerical representation. What most corresponds to the current image. **Results of researches.** In the presented method at each stage of comparison of a standard image with fragments of the current image it is offered to synthesize optimum numerical representation of a standard image, saves the order relation on its elements. Statistical tests were carried out. The comparative assessment of probability is carried out. It is studied, the object offered and normal square differential algorithms will how correctly be recognized. **Conclusion.** At high values of the signal-to-noise ratio, the proposed algorithm significantly exceeds the standard algorithm in the probability of correct image recognition.

**Keywords:** reference image, current image, brightness, maximum likelihood criterion, linear quasi-order ratio.

М. М. Багрій

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКРАНУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЕЦОДЯГУ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВПЛИВІВ

Проведено аналіз спеціального одягу, що використовується в Україні для захисту від електромагнітних впливів для працівників енергетичної галузі та експлуатаційників високочастотного електронного обладнання. В результаті аналізу існуючого спеціального захисного одягу, нормативної бази та експериментальних досліджень обґрунтовано доцільність проектування та розробки текстильних матеріалів для виготовлення спеціального захисного одягу з заданими екрануючими властивостями. Визначено критерії, яким повинен відповідати захисний одяг, а саме: достатні коефіцієнти екранування, прийнятні ергономічні характеристики, підвищена зносостійкість, збереження екрануючих властивостей в процесі експлуатації. В роботі у якості екрануючої субстанції використано збагачену залізу руду, отриману у результаті флотажі на Полтавському гірничозбагачувальному комбінаті. В лабораторних умовах розроблено технологію нанесення екрануючої субстанції на текстильний матеріал та проведено випробування захисних властивостей текстильного матеріалу з заданими екрануючими властивостями. Дослідження виконувалися на частоті мобільного зв'язку (1,8 ГГц) за допомогою каліброваного вимірювача щільності потоку енергії ПЗ-31 та на частоті 50 Гц за допомогою каліброваного вимірювача напруженості електричного та магнітного поля ПЗ-50. Для промислової частоти визначався коефіцієнт екранування магнітної складової електромагнітного поля. Визначено коефіцієнти екранування. Розроблено технологію виготовлення костюму з екрануючими властивостями. В технологічному процесі передбачено конструктивно з'єднати захисні елементи, що дає можливість в процесі експлуатації зберегти захисні властивості після прання. Перевагою розробленої конструкції є можливість змінювати ступені захисту в залежності від конкретних виробничих умов. Захисні елементи легко знімаються, що забезпечує можливість прання та хімічного чищення без втрати захисних властивостей спецодягу, а також за рахунок збільшення кількості шарів захисних елементів змінювати ступені захисту одягу для конкретних виробничих умов.

**Ключові слова:** спеціальний захисний одяг, електромагнітний екран, коефіцієнт екранування, латекс, текстильний матеріал, електромагнітне поле, елементи конструкції.

### Вступ

На сьогоднішній день в Україні склалася парадоксальна ситуація: поряд з розвитком високочастотного зв'язку, збільшенням кількості та підвищенням робочих напруг ліній електропередач та іншого електротехнічного обладнання спостерігається дефіцит захисного одягу для виконання регламентних та ремонтних робіт в умовах впливу електромагнітних полів.

Певною мірою це обумовлено тим, що більшість уваги приділяється засобам колективного захисту від електромагнітних впливів – матеріалів для облицювання великих поверхонь (у тому числі й композитних), екранування окремих технічних засобів, вирішення задач технічного захисту інформації.

Але такі матеріали мало придатні для вироблення засобів індивідуального захисту, зокрема екрануючих костюмів, що потребує розроблення новітніх матеріалів, дослідження їх захисних властивостей та створення одягу для захисту працюючих від впливу електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

На законодавчому рівні затверджено вимоги щодо захисту працівників від негативного впливу електромагнітних полів [1]. Відповідно до наказу від 05.02.2014 № 99 Міністерства енергетики та вугільної промисловості України обов'язковим є забезпечення працівників енергетичної галузі та експлуата-

ційників високочастотного електронного обладнання засобами індивідуального захисту від дії електромагнітних полів, а саме спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

### Стан питання

В останні роки в Україні розроблено кілька типів одягу для екранування магнітних полів - фартух електрозварювальника та екрануючий комплект для електротехніків [2, 3]. Ці вироби виготовлені зі стрічок з аморфного магнітомякого сплаву тканого плетіння. За прийнятних коефіцієнтів екранування вони мають низку недоліків: вони призначені для захисту від впливу тільки магнітних полів наднизьких частот та неергономічні через жорсткість конструкції. Більш прийнятні сучасні композитні матеріали [4, 5]. Але в них використовують вплетені у тканину мікро- і нанодоти, тобто побудовані на принципі тканини з дротами, яка використовується в Україні у енергетичній галузі і потребує заземлення, недостатньо стійка до механічних впливів тощо. До того ж згадані матеріали і вироби з них мають велику вартість.

В останні роки з'явилася низка досліджень та прикладних розробок щодо композитних металополімерних ізотропних матеріалів [6, 7]. Але ці матеріали призначені для захисту від впливу екранів дуже високих та ультрависоких частот. При цьому вони мають досить великі товщину і вартість та повністю

складаються з полімерних волокон, що не зовсім прийнятно для виготовлення спецодягу.

Перспективним є напрям виготовлення захисних матеріалів з використанням екрануючих частинок у полімерній матриці [8-10]. Але, наприклад, феритові частинки досить великі, тому для отримання прийнятного коефіцієнта екранування матеріал повинен мати велику товщину.

Останнім часом виконано ряд досліджень і розробок, де показано, що дрібнодисперсний залізорудний пил є дуже добрим наповнювачем для екрануючих матеріалів, при чому підвищення дисперсності збільшує коефіцієнти екранування.

Для залізних та залізвмісних частинок цей показник ще кращий [11, 12]. Але загальним недоліком цих розробок є використання виключно полімерних носіїв. Тому перспективним є розроблення захисного металовмісного покриття на текстильному носії.

**Метою роботи** є розроблення матеріалу для екранування електромагнітних полів на текстильній основі, дослідження його захисних властивостей та створення захисного одягу з нього.

### Результати досліджень

Для виготовлення спеціального одягу для захисту від впливу електромагнітних полів широкого частотного діапазону потрібен матеріал, який відповідає таким основним вимогам:

- достатні коефіцієнти екранування електромагнітних полів низьких та високих частот, тобто придатний для захисту працюючих в умовах впливу електромагнітних полів промислової частоти та її гармонік і при обслуговуванні обладнання бездротового зв'язку (ультрависокі частоти);
- прийнятні ергономічні характеристики – мала товщина, еластичність;
- високі міцність на розрив та термостійкість, прийнятні терморегуляційні властивості;
- збереження захисних властивостей після прання.

Як видно з наведеного, створити захисний матеріал, який би задовольняв усі вимоги вкрай важко. Тому доцільно у повному обсязі розв'язати задачі, пов'язані з першими двома вимогами, а сам захисний одяг проектувати комбінованим, із захисними вставками у костюм між шарами основного матеріалу та підкладки. Така технологія добре відпрацьована для виробництва бронезахисного одягу [13].

Для виготовлення захисних елементів було розроблено спеціальну технологію. У якості носія обрано льняну тканину, найбільш прийнятну для виготовлення спецодягу. Її перевагою є висока пористість волокон, що підвищує зчеплення екрануючої субстанції з основою.

У якості екрануючої субстанції обрано збагачену залізну руду, отриману у результаті флотажі на Полтавському гірничозбагачувальному комбінаті. На відміну від залізорудного пилу, що осідає на фільтрувальних завісах, у такому концентраті набагато більше заліза (до 73%) та його сполук (до 20%). До того ж його дисперсність вища. Це дає змогу

отримати матеріал малої товщини з достатніми коефіцієнтами екранування.

Залізорудний пил розчиняється у стандартному рідкому латексі у кількості 15-20%. Ця суміш наносилась на льняну тканину, яка прокатувалася крізь вальці та висушувалася.

Порівняно з технологією, описаною у попередній роботі [14], кількість залізної субстанції збільшено, а тиск під час прокатки підвищено. Це надало змогу отримати більш еластичний і тонкий матеріал (до 0,25 мм).

Було проведено випробовування захисних властивостей матеріалу. Дослідження виконувалися на частоті мобільного зв'язку (1,8 ГГц) за допомогою каліброваного вимірювача щільності потоку енергії ПЗ-31 та на частоті 50 Гц за допомогою каліброваного вимірювача напруженості електричного та магнітного поля ПЗ-50.

Для промислової частоти визначався коефіцієнт екранування магнітної складової електромагнітного поля (екранування електричної складової не складає проблеми через природу електричного поля). Результати випробувань захисних властивостей матеріалу наведено у табл. 1 та 2.

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта екранування електромагнітного поля  $K_e$  частотою 1,8 ГГц від кількості шарів захисного матеріалу  $n$ \*

$n$	1	2	3	4
$K_e$	2,8	5,6	9,6	17,0

\* Коефіцієнтом екранування вважається відношення щільності потоку енергії перед екраном до цього показника у захищеній зоні. Вихідна щільність потоку енергії 190-210 мкВт/см<sup>2</sup>.

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнта екранування електромагнітного поля  $K_e$  частотою 50 Гц від кількості шарів захисного матеріалу  $n$ \*

$n$	1	2	3	4
$K_e$	2,9	8,0	16,2	23,0

\* Коефіцієнтом екранування вважається відношення індукції магнітного поля перед екраном до цього показника у захищеній зоні. Вихідна індукція магнітного поля 230-240 мкТл.

Як видно з наведених даних, коефіцієнти екранування в обох випадках дещо вищі порівняно з даними, наведеними у [14].

Це пояснюється більш щільним розташуванням екрануючих частинок у матеріалі.

З розробленого матеріалу вирізалися зразки необхідних лінійних розмірів і розміщувалися між тканиною верху та підкладки.

Ескізний зразок моделі костюму з захисними елементами приведено на рис. 1. Перевагою такої конструкції є можливість змінювати ступені захисту у залежності від конкретних виробничих умов.

Були проведені натурні вимірювання захисних властивостей розробленого костюму.

Вимірювальні антени для реєстрації височастотного електромагнітного поля та магнітного поля промислової частоти вміщувалися між шарами пакету матеріалу куртки в зоні грудної клітки.

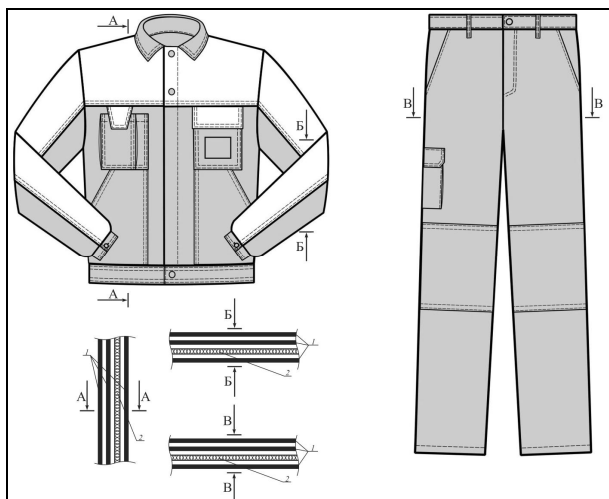


Рис. 1. Схематичне зображення зовнішнього вигляду костюму для захисту від впливу електромагнітних полів широкого частотного діапазону: 1 – текстильний матеріал основи; 2 – текстильний матеріал з екрануючими властивостями

Застосовувалися двошарові захисні елементи. Це пояснюється тим, що на найбільш поширених робочих місцях працівників енергетичної галузі, що виконують роботи в виробничому середовищі при невимкнених електроустановках напругою до 750 кВ зони III (наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.07.1997 № 198 «Про затвердження Державних санітарних правил і норм при виконанні робіт в не вимкнених електроустановках напругою до 750 кВ включно») мінімальний коефіцієнт екранування повинен складати 5. А згідно табл. 2 це відповідає двом шарам матеріалу. У результаті вимірювань встановлено, що коефіцієнт екранування в зоні грудної клітки складає 6,7-7,0 за магнітною складовою електромагнітного поля промислової частоти.

Зменшення коефіцієнта екранування відносно лабораторних випробувань матеріалу пояснюється неоднорідністю шарів пакету матеріалів костюму, тобто неповною замкненістю екрана.

Щодо екранування електромагнітного поля частотою 1-8 ГГц, то коефіцієнт екранування складає 5,2-5,4. Добра збіжність з лабораторними випробуваннями прогнозована і пояснюється малою довжиною електромагнітної хвилі.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Вимог до роботодавців щодо захисту працівників від шкідливого впливу електромагнітних полів: затв. наказом М-ва енергетики та вугільної промисловості України від 5 лютого 2014 р. № 99. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 25 лютого 2014р. № 335/25112.
2. Левченко О.Г., Левчук В.К., Тимошенко О.Н. Экранирующие материалы и средства индивидуальной защиты сварщика от магнитных полей. *Автоматическая сварка*. 2011. № 3. С. 49–55.
3. Пат. 90892 України: МПК G12B 17/00. Екрануючий комплект. Здановський В.Г., Левченко Л.О., Осадчий Д.Б., Паньків Х.В., Подобед І.М. Опубл. 10.06.2014. Бюл. № 11.
4. Ceken F., Pamuk G., Ozkurt A., Ugurlu S. Electromagnetic Shielding Properties of Plain Knitted Fabrics Containing Conductive Yarns. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2012. № 7. P. 81–87.
5. Ахмед А.А. Экраны электромагнитного излучения на основе модифицированных хлопкополиэфирных тканых полотен с наноструктурированным микропроводом: автореф. дис. канд. техн. наук: Методы и системы защиты информации, информационная безопасность. Минск. 2016. 22 с.
6. Filippo Costa, Simone Genovesi, Agostino Monorchio, Giuliano Manara. Low-Cost Metamaterial Absorbers for Sub-GHz Wireless Systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2014. № 13. P. 27–30.
7. Viraj Bhingardive, Maya Sharma, Satyam Suwas, Gridhar Madras, Suryasarathi Bose. Polyvinylidene fluoride based light-weight and corrosion resistant electromagnetic shielding materials. *RSC Advances*. 2015. № 5. P. 35909–35916.

Перевагою костюму є те, що захисні елементи легко знімаються, що забезпечує можливість прання без втрати захисних властивостей спецодягу.

Використання розробленої технології дозволяє отримувати захисний матеріал потрібних параметрів. Для цього експериментально визначаються коефіцієнти екранування матеріалу у залежності від його товщини та вмісту екрануючої субстанції. Для цього можна використати відоме співвідношення для довгого циліндричного екрана:

$$K_e \approx \frac{\mu_{\text{эф}}(b^2 - a^2)}{4b^2}, \quad (1)$$

де  $K_e$  – коефіцієнт екранування;  $\mu_{\text{эф}}$  – ефективна магнітна проникність матеріалу;  $b$ ,  $a$  – зовнішній та внутрішній радіус екрана ( $b-a$  – товщина стінки).

На основі експериментальних даних щодо коефіцієнта екранування визначається залежність ефективної магнітної проникності від геометричних та фізико-хімічних параметрів екрана.

Цю залежність використовують у подальшому для отримання екрануючого матеріалу з коефіцієнтом екранування, відповідними умовами експлуатації захисного одягу.

#### Висновки

1. Обґрунтовано необхідність розробки екрануючого текстильного матеріалу для захисту від впливів електромагнітних полів широкого частотного діапазону, придатного для виготовлення засобів індивідуального захисту для працівників енергетичної галузі та експлуатаційників високочастотного електронного обладнання.

2. Отриманий текстильний матеріал з заданими екрануючими властивостями має коефіцієнт екранування ( $K_e$ ) для частоти мобільного зв'язку 1,8 ГГц – 2,8-17,0 (зі збільшенням кількості шарів матеріалу зростає  $K_e$ ), для частоти 50 Гц – 2,9-23,0.

3. Розроблений одяг має прийнятні захисні властивості та ергономічні характеристики. З'єднання елементів конструкції захисного одягу дозволяє підвищити екрануючі властивості за рахунок збільшення шарів захисних елементів та здійснювати хімічне чищення та прання одягу без втрати захисних властивостей.



8. Patil N., Velhal N., Pawar R., Puri V. Electric, magnetic and high frequency properties of screen printed ferrite-ferroelectric composite thick films on alumina substrate. *Microelectronics International*. 2015. №. 32 (1). P. 25–31.
9. Sedlacik M., Mrlik M., Babayan V., Pavlinek V. Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. *Composite Structures*. 2016. №. 135. P. 199–204.
10. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
11. Glyva V., Podkopaev S., Levchenko L., Karaieva N., Nikolaiev K., Tykhenko O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. №. 1/5 (91). P. 10–17. («Scopus», «Index Copernicus»).
12. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5 (96). P. 54–61. («Scopus», «Index Copernicus»).
13. Багрий М.М., Мойсеєнко С.І., Омельченко С.В. До питання захисту людини в сучасних засобах індивідуального бронезахисту. *Вісник Технологічного університету Поділля*. 2003. № 5. С. 65-67.
14. Тихенко О.М., Багрий М.М., Левченко Л.О., Хомаковський О.В., Резнік Д.В. Розроблення та дослідження захисних властивостей металотекстильних електромагнітних екранів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2019. № 3. С. 47-51.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М. І. Адаменко,  
Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

Received (Надійшла) 27.06.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

### Разработка и исследование экранирующих свойств спецодежды для защиты от электромагнитных воздействий

М. М. Багрий

Проведен анализ специальной одежды, используемой в Украине для защиты от электромагнитных воздействий для работников энергетической отрасли и эксплуатационников высокочастотного электронного оборудования. В результате анализа и экспериментальных исследований обоснована целесообразность проектирования и разработки текстильных материалов для изготовления специальной защитной одежды с заданными экранирующими свойствами. Определены критерии, которые предъявляются к защитной одежде, а именно: достаточные коэффициенты экранирования, приемлемые эргономические характеристики, повышенная износостойкость, сохранение экранирующих свойств в процессе эксплуатации. В работе в качестве экранирующей субстанции используется обогащенная железная руда, полученной в результате флотации на Полтавском горно-обогатительном комбинате. В лабораторных условиях разработана технология нанесения экранирующей субстанции на текстильный материал и проведены испытания защитных свойств текстильного материала с заданными экранирующими свойствами. Исследования выполнялись на частоте мобильной связи (1,8 ГГц) с помощью калиброванного измерителя плотности потока энергии ПЗ-31 и на частоте 50 Гц с помощью калиброванного измерителя напряженности электрического и магнитного поля ПЗ-50. Для промышленной частоты определялся коэффициент экранирования магнитной составляющей электромагнитного поля. Определены коэффициенты экранирования. Разработана технология изготовления костюма с экранирующими свойствами. В технологическом процессе предусмотрено конструктивно съемные защитные элементы, что позволяет в процессе эксплуатации сохранить защитные свойства после стирки. Преимуществом разработанной конструкции является возможность изменять степени защиты в зависимости от конкретных производственных условий. Защитные элементы легко снимаются, что обеспечивает возможность стирки и химической чистки без потери защитных свойств спецодежды, а также за счет увеличения количества слоев защитных элементов, регулировать степень защиты специальной одежды для конкретных производственных условий.

**Ключевые слова:** специальная защитная одежда, электромагнитный экран, коэффициент экранирования, латекс, текстильный материал, электромагнитное поле, элементы конструкции.

### Development and study of shielding properties special clothes for protection against electromagnetic exposure

M. Bahrii

The analysis of special clothing which uses in Ukraine for protection from electromagnetic influences for the employees of the power industry and operators of e-technology electronic equipment is carried out. As a result of analysis and experimental research, has been substantiated the expediency of designing and developing textile materials for the production of special protective clothing with given shading properties. The criteria to be met by protective clothing, namely: adequate shielding coefficients, acceptable ergonomic characteristics, increased wear resistance, and the preservation of screening properties during operation, are determined. In the work were investigated the screening properties of the enriched iron ore obtained as a result of flotation at the Poltava Mining and Enrichment Plant. Under the laboratory conditions, a technology for applying a screening substance to a textile material was developed and a test of the protective properties of a textile material with given shielding properties was performed. The research was carried out at a mobile communication frequency (1.8 GHz) using a calibrated power flux density measuring device D3-31 and a frequency of 50 Hz using a calibrated electric and magnetic field tester D3-50. For the industrial frequency, the coefficient of screening of the magnetic component of the electromagnetic field was determined. The coefficients of shielding are determined. Was developed the technology of making a suit with shielding properties. In the technological process it is constructively provided with capacitive protective elements, which makes it possible during the operation to maintain the protective properties after washing. The advantage of the developed design is the ability to vary the degree of protection depending on the specific production conditions. Protective elements are easily removed, which ensures the need for washing and chemical cleaning without losing the protective properties of overalls.

**Keywords:** special protective clothing, electromagnetic screen, shielding coefficient, latex, textile material, electromagnetic field, structural elements.

В. А. Глива<sup>1</sup>, О. М. Тихенко<sup>1</sup>, О. В. Ходаковський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ НЕОДНОРІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

У інженерній практиці у якості технологічних та функціональних отворів у захисних конструкціях використовуються отвори круглої та прямокутної форми, тому предметом дослідження було визначення впливу таких отворів на коефіцієнт екранування. Мета роботи – розробити методологічні засади проектування електромагнітних екранів з неоднорідностями різного характеру та надати прийнятний за припущеннями та зручний у практичній діяльності розрахунковий апарат для прогнозування ефективності екранування. Розроблено розрахунковий апарат для прогнозування захисних властивостей електромагнітних екранів та методологію його застосування для проектування екрануючих поверхонь. Запропонований підхід для визначення коефіцієнтів екранування електромагнітних екранів з неоднорідностями у вигляді круглих та лінійних отворів, що дозволяє спроектувати екран з необхідними захисними властивостями та з потрібною або достатньою кількістю отворів. Запропонована методологія дозволяє проектувати неоднорідні екрани з максимально прийнятною кількістю отворів для забезпечення потрібної вентиляції екранованих високочастотних джерел електромагнітних полів у апаратних аеродромах, лікувальних закладів тощо.

**Ключові слова:** електромагнітний екран, коефіцієнт екранування, ефективність екранування.

### Вступ

У сучасних умовах різноманітності джерел електромагнітних полів широкого частотного діапазону, які використовуються у виробничих процесах, та значного впливу на електромагнітну обстановку зовнішніх джерел, найбільш ефективними засобами захисту працюючих є застосування електромагнітних екранів. Більшість досліджень щодо технологій їх розроблення є експериментальними і стосуються, в основному, суцільних однорідних поверхонь. Роботи щодо створення неоднорідних екранів (з регулярними отворами різної форми, сітчастих) у частині розрахунків їх ефективності здебільшого базуються на емпіричних або напівемпіричних співвідношеннях, які у багатьох випадках дають значні розбіжності з експериментом. Тому актуальною є задача розроблення прийнятного за припущеннями, зручного у користуванні розрахункового апарату для прогнозування захисних властивостей електромагнітних екранів та методології його застосування для проектування екрануючих поверхонь.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Більшість даних, наведених у доступних джерелах щодо неоднорідних електромагнітних екранів, стосуються екрануючих матеріалів з регулярними структурами у тілі (матриці) екрана. Так, у роботах [1, 2] наведено результати розрахунків та випробувань ефективності електромагнітних екранів з імплантованими у полімерний матеріал мідних, графітових та залізовмісних лінійних структур (товщиною сотні мікрон і більше). У цих випадках матеріали розглядалися як електромагнітні кристали. Інший підхід до створення електромагнітних екранів реалізовано у дослідженнях [3–5], де у якості екрануючої субстанції використовуються рівномірно розміщені у полімерній матриці металеві та металовмісні нано- та мікрочастинки. Зокрема показано, що коефіцієнти екранування електромагнітних полів як низьких, так і високих частот підвищуються зі збільшенням дис-

персності екрануючої субстанції. Але такі матеріали хоча і неоднорідні, але ізотропні за конструкцією. Однією з задач забезпечення потрібних рівнів захисту є, поряд з прийнятними коефіцієнтами екранування, необхідність мати отвори у екранах. Такі отвори можуть використовуватися для вводу-виводу кабелів (одиначні), для забезпечення вентиляції, огляду (регулярні). Наявність таких отворів необхідно враховувати при проектуванні екранів. У роботах [6, 7] наведено методики розрахунку та результати експериментальних досліджень ефективності електромагнітних екранів за наявності круглих та прямокутних отворів, що узагальнено у дисертаційному дослідженні [8]. Але усі конкретні співвідношення, подані у роботі, емпіричні або напівемпіричні. Не показано, які припущення зроблено при їх визначенні. Тому розрахунки за ними мають великі розбіжності з експериментальними даними, що показано у роботі [9]. В той же час існують добре опрацьовані засади розрахунку впливу неоднорідностей будь-якого походження на ефективність екранування [10–13], які можливо адаптувати для використання фахівцями-практиками у галузі електромагнітної безпеки. Такий підхід реалізовано у роботі [14], де на основі коректних співвідношень отриманий зручний розрахунковий апарат для визначення коефіцієнтів екранування сітчастих електромагнітних екранів у залежності від геометричних характеристик періодичних структур, кутів падіння електромагнітних хвиль тощо.

**Постановка завдання.** Мета роботи – розробити методологічні засади проектування електромагнітних екранів з неоднорідностями різного характеру та надати прийнятний за припущеннями та зручний у практичній діяльності розрахунковий апарат для прогнозування ефективності екранування.

### Виклад основного матеріалу

У інженерній практиці у якості технологічних та функціональних отворів у захисних конструкціях

використовуються отвори круглої та прямокутної форми. Тому визначимо вплив таких отворів на коефіцієнт екранування. Вважаємо, що товщина стінки металевий пластини з отвором така, що за його

відсутності магнітне поле не проникає у закритий простір. Розглянемо достатньо велику провідну пластину з отвором, уздовж якої спрямоване однорідне магнітне поле напруженістю  $H_0$ .

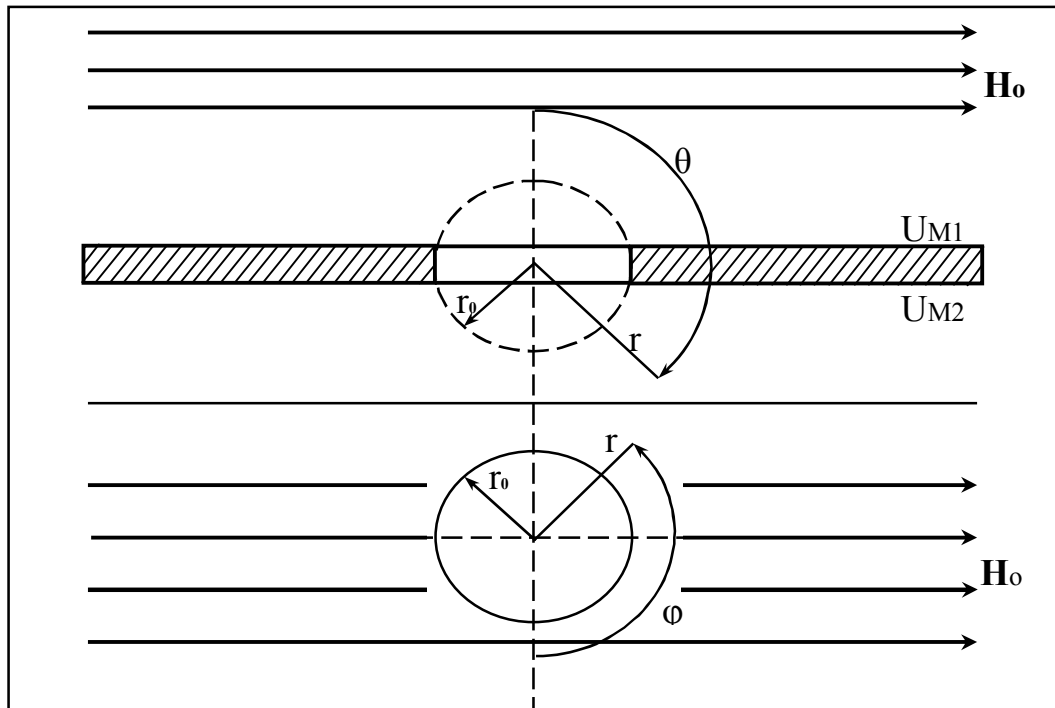


Рис. 1. Екрануюча пластинка з круглим отвором

Позначимо скалярний магнітний потенціал поля над пластиною як  $U_{M1}$ , а  $U_{M2}$  – у захищеній зоні. Введемо сферичні координати з початком у центрі отвору ( $r, \theta, \varphi$ ). Виходячи з фундаментального співвідношення

$$H = -grad U_M,$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} U_{M1} = H_0 r \sin \theta \sin \varphi, \quad 0 < \theta < \frac{\pi}{2}.$$

Рівняння Лапласа має вигляд:  $\nabla^2 U_M = 0$ .

Вважаємо, що частота магнітного поля достатньо висока і воно не проникає у металевий екран:

$$H_1 = 0, \quad \theta = \pi / 2$$

Скалярні потенціали у кожній зоні є такими:

$$U_{M1} = H_0 r \sin \theta \sin \varphi + \sin \varphi \sum_{n=1,3}^{\infty} C_n r^{-n-1} P_n(\cos \theta),$$

$$r \geq r_0, \quad 0 < \theta < \pi / 2,$$

$$U_{M2} = -\sin \varphi \sum_{n=1,3}^{\infty} C_n r^{-n-1} P_n(\cos \theta),$$

$$r \geq r_0, \quad \pi / 2 < \theta < \pi.$$

де  $P_n(\cos \varphi)$  - поліном Лежандра;  $C_n$  - сталі інтегрування (амплітудні значення просторових гармонік поля).

Розв'язання цих рівнянь можна поєднати у одне для зовнішньої області. При умови неперервності

дотичних і нормальних складових напруженості магнітного поля на поверхні сферичної зони отвору ( $r = r_0$ ) отримуємо системи рівнянь для визначення сталих інтегрування, а з них – співвідношення для визначення потенціалів  $U_{M1}$  та  $U_{M2}$  [10].

Коефіцієнт екранування плоским екраном з круглим отвором можна представити у вигляді:

$$K_e \approx U_{M1} / U_{M2} = - \left[ \sin \theta + \left( \frac{2}{\pi} \right) \cdot \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{(-1)^{0,5(n-1)}}{n(n+2)} \left( \frac{r_0}{r} \right)^n P_n(\cos \theta) \right] x \left[ \left( \frac{2}{\pi} \right) \cdot \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{(-1)^{0,5(n-1)}}{n(n+2)} \left( \frac{r_0}{r} \right)^{n+2} P_n(\cos \theta) \right]^{-1}.$$

Складність цього виразу уявна через те, що практичну зацікавленість представляє коефіцієнт екранування на великій відстані від отвору ( $r \gg r_0$ ), тому можна відкинути усі члени ряду, крім першого. У цьому випадку отримаємо:

$$K_e \approx \left[ 1 - \left( \frac{2}{3\pi} \right) \left( \frac{r_0}{r} \right)^3 \right] \left[ \left( \frac{2}{3\pi} \right) \left( \frac{r_0}{r} \right)^3 \right]^{-1}.$$

Як видно, для цього випадку коефіцієнт екранування є функцією розмірів. Можна також зробити висновок, що отвір діє як магнітний диполь, розташований у центрі отвору, з віссю, паралельною спрямованості поля у площині екрана. Момент диполя пропорційний кубу радіусу отвору  $r_0$ . Цей результат є важливим через те, що надає змогу роз-

глядати регулярно розташовані отвори (перфорацію) як систему диполів, сумарне поле яких у захищеній зоні можна легко обчислити. У багатьох випадках існують або потрібні щільові отвори або неоднорід-

ності (наприклад, місця з'єднання елементів) у електромагнітному екрані.

Розглянемо достатньо довгу (по відношенню до ширини) щілину (рис. 2).

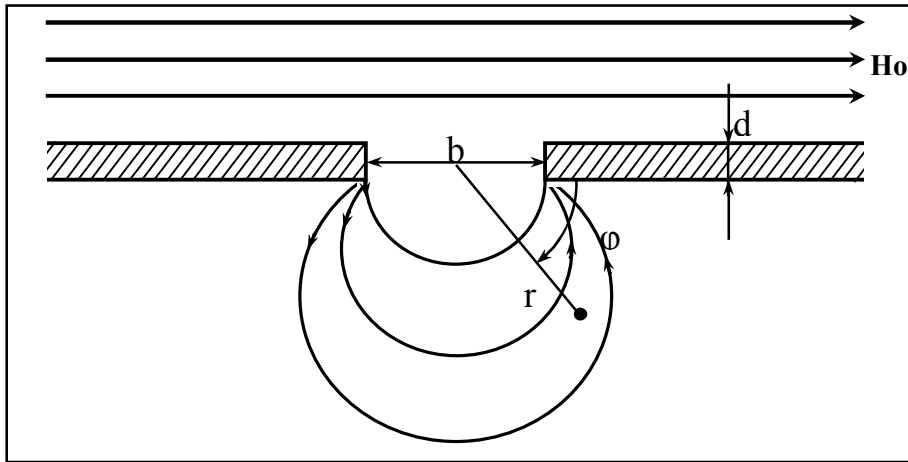


Рис. 2. Екрануюча пластина з круглим отвором

Вважаємо, що стінка екрана має кінцеву товщину, а магнітне поле спрямоване уздовж екрана. У цьому випадку поле усередині екрана можна вважати генерованим магнітним диполем, розташованим усередині щілини. Вісь диполя спрямована паралельно лініям однорідного магнітного поля. Також вважаємо, що змінне магнітне поле проникає крізь поверхню екрана, а щілина достатньо вузька ( $b \leq d$ ) [10]. У полярних координатах ( $r, \varphi$ ) скалярний магнітний потенціал за екраном визначається як:

$$U_M = (2b/\pi)^2 [1 + (1-i) \cdot (2 + \pi + \pi d/b) \cdot (\delta/b)] \times \exp[-(\pi d/b + 2)] H_0 \cdot \cos \varphi / r.$$

Фактично глибина проникнення поля у стінку екрана пропорційна еквівалентній глибині проникнення і характеризується кутом фазового зсуву  $\pi/4$ . За умови великої частоти глибина зменшується. Напруженість магнітного поля у просторі за екраном з урахуванням  $H = -\text{grad}U_M$ :

$$H = (2b/(\pi r))^2 [1 + (1-i) \cdot (2 + \pi + \pi d/b) \cdot (\delta/b)] \times H_0 \exp[-(\pi d/b + 2)].$$

Еквівалентна глибина проникнення поля у матеріал екрана визначається зі співвідношення:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_a \sigma}},$$

де  $f$  – частота магнітного поля;  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність матеріалу екрана.

Коефіцієнт екранування визначається як

$$K_e = \frac{H_0}{H}.$$

Як видно з наведених співвідношень, коефіцієнт екранування залежить від відстані точки визначення поля до щілини. Крім того, ефективність екранування значною мірою залежить від співвідно-

шення  $b/d$ . Для  $b \gg d$  скалярний магнітний потенціал можна представити у вигляді нескінченних рядів [10]. З них впливає, що напруженість магнітного поля у центрі щілини дорівнює  $H_0/2$ , а коефіцієнт екранування поля, паралельного екрану на великій відстані від отвору ( $r \gg 0,5 b$ ), визначається як:

$$K_e(r) \approx 16r^2/b^2.$$

Якщо поле спрямоване перпендикулярно екрану зі щілиною:

$$K_e(r) \approx [\pi r/(2b)]^2 \exp[(\pi d/b) + 2].$$

Як і у випадку з круглим отвором, той факт, що наявність щілини еквівалентна наявності у цій точці магнітного диполя дозволяє розраховувати коефіцієнт екранування екрана з регулярними прорізами як площини із системою магнітних диполів.

## Висновки

1. Запропонований підхід до визначення коефіцієнтів екранування електромагнітних екранів з неоднорідностями у вигляді круглих та лінійних отворів дозволяє спроектувати екран необхідних захисних властивостей з потрібною або достатньою кількістю отворів.

2. Той факт, що наявність отвору у екрані еквівалентна наявності у цьому місці магнітного диполя, який розповсюджує магнітне поле у заекранний простір, надає змогу максимально точно розрахувати ефективність електромагнітних екранів з різним типом перфорації.

3. Запропонована методологія дозволяє проектувати неоднорідні екрани на принципі розумної достатності. Максимально прийнятна кількість отворів дозволяє забезпечити потрібну вентиляцію екранованих високочастотних джерел електромагнітних полів у апаратних аеродромів, лікувальних закладів тощо.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зотов И. С., Бычков И. В., Федий А. А. Исследование амплитудно-частотной характеристики коэффициента пропускания двумерного электромагнитного кристалла, образованного медными цилиндрами. *Письма в ЖТФ*. Т. 37. № 23. 2011. С. 39–44.
2. Ceken F., Pamuk G., Ozkurt A., Ugurlu S. Electromagnetic Shielding Properties of Plain Knitted Fabrics Containing Conductive Yarns. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2012. № 7. P. 81–87.
3. Bhattacharjee S. Protective Measures to Minimize the Electromagnetic Radiation. *Electronic and Electric Engineering*. 2014. № 4. P. 375–380.
4. Jalali M., Dauterstedt S., Michaud A., Wuthrich R. Electromagnetic shielding of polymer-matrix composites with metallic nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*. 2011. P. 1420–1426.
5. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5 (96). P. 54–61.
6. Демский Д. Ф., Фомина И. А., Марченко М. В. Автоматизация расчетов эффективности экранирования. *Технологии ЭМС*. 2013. № 1. С. 44–54.
7. Журавлев И. Н., Кечиев Л. Н., Крючков Н. М. Специализированный измеритель напряженности электрического поля для измерения эффективности экранирования. *Технологии ЭМС*. 2013. № 1. С. 23–28.
8. Демский Д. В. Метод расчета эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов: диссертация. Москва, 2014. 114 с.
9. Думанський В. Ю., Біткін С. В., Полька Н. С. Стан електромагнітної обстановки в загальноосвітніх закладах, обладнаних комп'ютерною технікою та засобами передачі даних типу WI-FI. *Гігієна населених місць*. 2013. № 62. С. 177–186.
10. Аполлонский С. М. Справочник по расчёту электромагнитных экранов. *Энергоатомиздат*. 1998. 224 с.
11. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
12. Amin Salih M. and Potrus M.Y. (2015), "A Method for Compensation of Tcp Throughput Degrading During Movement Of Mobile Node", *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*, Vol. 27, No 6, pp. 59–68.
13. Аполлонский С. М., Логинова И. Д. Построение моделирующих устройств для исследования внешних электрических полей источников. *Энергетика и транспорт*. 2009. № 1. С. 104–110.
14. Glyva V., Kovalenko V., Levchenko L., Tykhenko O. Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Is. 3/12 (87). pp. 50–55.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М. І. Адаменко,

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

Received (Надійшла) 31.05.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 07.08.2019

### Методология проектирования неоднородных электромагнитных экранов

В. А. Глыва, О. Н. Тихенко, А. В. Ходаковский

В инженерной практике в качестве технологических и функциональных отверстий в ограждающих конструкциях используются отверстия круглой и прямоугольной формы, поэтому предметом исследования было определение влияния таких отверстий на коэффициент экранирования. Цель работы - разработать методологические основы проектирования электромагнитных экранов с неоднородностями различного характера и предоставить приемлемый по предположениям и удобный в практической деятельности расчетный аппарат для прогнозирования эффективности экранирования. Разработан расчетный аппарат для прогнозирования защитных свойств электромагнитных экранов и методологию его применения для проектирования экранирующих поверхностей. Предложенный подход для определения коэффициентов экранирования электромагнитных экранов с неоднородностями в виде круглых и линейных отверстий, позволяет спроектировать экран с необходимыми защитными свойствами и с нужным или достаточным количеством отверстий. Предложенная методология позволяет проектировать неоднородные экраны с максимально приемлемым количеством отверстий для обеспечения нужной вентиляции экранированных высокочастотных источников электромагнитных полей в аппаратных аэродромах, лечебных учреждениях и тому подобное.

**Ключевые слова:** электромагнитный экран, коэффициент экранирования, эффективность экранирования.

### Methodology of designation of homogeneous electromagnetic screens

V. Glyva, O. Tykhenko, O. Khodakovskyy

In engineering practice, holes of circular and rectangular shape are used as technological and functional openings in protective structures, so the object of the study was to determine the effect of such openings on the shielding factor. The purpose of the work was to develop a methodological basis for the design of electromagnetic screens with heterogeneities of different nature and to provide a reasonable and practical calculation device for predicting the efficiency of screening. A calculation apparatus for the prediction of the protective properties of electromagnetic screens and a methodology for its use for the design of shielding surfaces have been developed. An approach is proposed to determine the shielding coefficients of electromagnetic screens with inhomogeneities in the form of circular and linear openings, which allows the design of a screen with the necessary protective properties and with the required or sufficient number of openings. The proposed methodology allows to design inhomogeneous screens with the maximum acceptable number of openings to provide the required ventilation of shielded high-frequency sources of electromagnetic fields in hardware aerodromes, medical institutions, etc.

**Keywords:** electromagnetic screen, shielding factor, shielding efficiency.

В. І. Василюшин<sup>1</sup>, В. Д. Луняка<sup>2</sup>, В. П. Коцюба<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup>Військова частина А0306, Україна

## СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДОМ ESPRIT З ВИКОРИСТАННЯМ ОЦІНКИ ТЕПЛІЦЕВОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ МАТРИЦІ

**Предметом** вивчення в статті є – методи спектрального аналізу, методи оцінювання тепліцевих кореляційних матриць. **Мета даної статті** – підвищення ефективності спектрального аналізу (зменшення середньоквадратичної похибки (СКП) оцінювання кутових координат джерел випромінювання) в умовах порогового відношення сигнал-шум (ВСШ) зі збереженням заданої ефективності при високих та середніх ВСШ. Використовуваними **методами** є: методи спектрального аналізу, методи цифрового статистичного моделювання. **Результати.** Для забезпечення високої точності оцінювання кутових координат джерел випромінювання при використанні лінійної антенної решітки та сучасних методів спектрального аналізу пропонується в умовах порогового ВСШ використовувати оцінку тепліцевої кореляційної матриці (КМ), що отримується методом LRA. З метою уникнення ефекту постійності середньоквадратичної похибки оцінювання кутових координат при середніх та високих ВСШ запропоновано використовувати традиційну оцінку КМ. **Висновки.** Проведене дослідження показало, що використання запропонованого підходу дозволяє підвищити точність оцінювання кутових координат джерел випромінювання в умовах порогового ВСШ та уникнути ефекту постійності СКП оцінювання при середніх та високих ВСШ за рахунок використання традиційної оцінки КМ, яка при пеленгації джерел шумового випромінювання є максимально правдоподібною оцінкою невідомої КМ. Зазначені результати окрім розглянутого випадку пеленгації джерел випромінювання можуть бути використані при оцінюванні стану каналу зв'язку та в ряді інших випадків. Напрямок подальших досліджень є використання інших методів оцінювання тепліцевої КМ, пошук шляхів зменшення різниці в точності оцінювання запропонованим методом від випадку використання тепліцевої оцінки КМ в умовах середніх ВСШ.

**Ключові слова:** тепліцева кореляційна матриця, максимально правдоподібна оцінка кореляційної матриці, спектральне розкладення матриці, методи спектрального аналізу.

### Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** У теперішній час функціонування сучасних систем зв'язку, радіолокації (включаючи системи розпізнавання) ґрунтується на використанні кореляційної обробки сигналів (оцінюванні кореляційних матриць сигналів), принципів просторового рознесення (технології МІМО (multiple input-multiple output systems)) і т.д. Ефективність функціонування при цьому суттєво залежить від точності формуємих оцінок кореляційних матриць вхідних спостережень [1-8].

Так, наприклад, ефективність сучасних методів спектрального аналізу (СА), що використовуються в сучасних системах зв'язку та радіолокації і дозволяють здійснювати оцінювання кутових координат джерел випромінювання в режимі надрозрізнення, може бути покращена за рахунок використання априорної інформації про структуру КМ (тепліцевості, периметрії тощо). [3-8] Такі методи використовують спектральне розкладення КМ даних, в результаті якого отримуються оцінки власних значень та власних векторів КМ, та елементи апарату функціонального аналізу (спектральне подання оператора (пучка операторів) і т.д.). Спектральне подання матриць даних, так званих канальних матриць, кореляційних матриць також знайшло широке застосування в методах обробки сигналів в адаптивних антенних решітках, аналізі спектральної ефективності МІМО систем і в ряді інших випадків [1, 2].

Використання інформації про специфіку структури КМ створює передумови для підвищення швидкодії (зменшення числа вибірок, що необхідне для отримання оцінки КМ заданої якості) у порівнянні з випадком КМ загального вигляду, яка має місце у системах з довільною структурою каналів прийому, зменшувати вплив корельованості сигналів джерел випромінювання на ефективність методів СА, покращувати ефективність вирішення задачі виявлення-вимірювання [5].

Усереднення елементів КМ загального виду, що знаходяться на діагоналях, паралельних основній діагоналі, є одним з шляхів отримання оцінки тепліцевої КМ [3-5]. Такий підхід в технічній літературі відомий як LRA –lag redundancy averaging (усереднення надлишковості кореляційних моментів). Проте використання такої оцінки призводить до сталості середньоквадратичної похибки (СКП) оцінювання кутових координат джерел випромінювання методами СА при середніх і високих відношеннях сигнал-шум [5, 7, 8]. Використання традиційної оцінки КМ не приводить до такого ефекту.

**Мета статті** – підвищення ефективності спектрального аналізу в умовах порогового відношення сигнал шум та усунення ефекту постійності величини СКП оцінювання при середніх та високих ВСШ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанню підвищення ефективності спектрального аналізу присвячено багато робіт. Покращення оцінки КМ спостережень досягається за рахунок викорис-

тання певної попередньої обробки, пов'язаної з застосуванням методу LRA, технології сурогатних даних, методів оцінювання персиметричної КМ [1, 5]. Уваги заслуговує напрямок, пов'язаний з використанням методу SSA (singular spectrum analysis), в якому обробка може здійснюватися як на рівні матриці даних, так і на рівні КМ [5]. Проте його узагальнення на випадок АР викликає певні ускладнення. Викликає інтерес розробка підходу, який дозволить би використати переваги застосування оцінки теплицевої КМ в умовах порогового ВСШ при обробці сигналів в АР.

### Основна частина

Нехай на  $M$ -елементу лінійну еквідистантну АР (ЛЕАР) надходять сигнали від  $V$  джерел випромінювання. Шум спостереження є білий за простором і часом та вважається стаціонарним, некорельованим випадковим процесом з нульовим середнім [1, 2].

Сигнали джерел випромінювання у випадку пеленгації джерел шумового випромінювання відрізняються від шумів потужністю. У випадку визначення кутових координат джерел випромінювання (ДВ) для систем зв'язку сигнали є характерними для такої системи (QPSK, QAM та інші) [1, 2].

$M \times 1$  вектор спостережень може бути поданий як [1-8]

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

де  $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_V)]$  –  $M \times V$  матриця векторів напрямків надходження (НН) сигналів ДВ  $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_V]^T$  –  $V \times 1$  вектор НН сигналів ДВ. Стовпцями матриці  $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$  є вектори  $\mathbf{a}(\theta) = [1, \exp(j\omega), \dots, \exp(j(M-1)\omega)]^T$ . Такий вектор є  $M \times 1$  вектором фазування, що відповідає напрямку  $\theta$ ,  $\omega = 2\pi d \sin \theta / \lambda$  – фазовий зсув між елементами АР,  $d$  – міжелементна відстань,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $(\cdot)^T$  означає операцію транспонування. Крім того,  $\mathbf{s}(t)$  є  $V \times 1$  вектором сигналів,  $\mathbf{n}(t)$  –  $M \times 1$  вектор адитивного шуму.

$M \times M$  КМ спостережень може бути визначена як

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{S}\mathbf{A}^H(\boldsymbol{\theta}) + \sigma^2\mathbf{I}, \quad (2)$$

де  $E[\cdot]$  і  $(\cdot)^H$  – оператори математичного очікування і ермітового транспонування,  $\mathbf{S} = E[\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)]$  –  $V \times V$  КМ сигналів,  $\sigma^2$  – дисперсія шуму,  $\mathbf{I}$  – одинична матриця.

Спектральне розкладення КМ  $\mathbf{R}$  має вигляд [1]

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}_s \boldsymbol{\Lambda}_s \mathbf{E}_s^H + \sigma^2 \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H, \quad (3)$$

де  $M \times V$  матриця  $\mathbf{E}_s$  містить власні вектори (ВВ), пов'язані з сигнальними (найбільшими) власними значеннями (ВЗ) діагональної матриці  $\boldsymbol{\Lambda}_s$ .  $M \times (M - V)$  матриця  $\mathbf{E}_n$  містить ВВ підпростору шуму (ППШ).

Таке розкладення є основою для використання сучасних методів СА, основаних на використанні підпросторів (МОВП).

У випадку використання методу LRA здійснюється усереднення елементів матриці  $\mathbf{R}$ . У результаті отримується вектор усереднених значень кореляційних моментів, на основі якого формується теплицева КМ  $\mathbf{R}_m$ .

Особливістю даної роботи є потреба використання матриці  $\mathbf{R}_m$  та її спектрального розкладення у випадку низького (порогового ВСШ) та звичайної КМ у інших випадках.

З метою забезпечення вибору тої чи іншої оцінки КМ в роботі використовується так званий формулатор променя діаграми спрямованості, що визначається виразом  $P_{BF}(\theta) = \mathbf{a}^H(\theta)\hat{\mathbf{R}}\mathbf{a}(\theta)$ . Він використовується і в ряді інших випадків [1,5]. Даний метод дозволяє визначити сектори локалізації ДВ. У випадку одного сектору визначається його ліва і права межі  $\theta_{iL}, \theta_{iR}, i = 1, \dots, C$ , тобто

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_c = [\theta_{iL}, \theta_{iR}]. \quad (4)$$

З метою визначення порядку переходу від використання однієї оцінки КМ до іншої використовується гіпотеза, яка може бути сформульована таким чином.

Н: Метод СА дозволяє одержати оцінки кутових координат  $V$  ДВ в секторах їх локалізації  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_c$ .

У якості методу СА в роботі використано метод ESPRIT (estimation of signal parameters via rotation invariance technique – оцінювання параметрів сигналу на основі інваріантності щодо повороту) [1,5].

Оцінювання кутових координат МОВП ESPRIT базується на наближеній рівності  $\mathbf{E}_s = \mathbf{A}\mathbf{T}$  (знак дорівнює характерний при великих ВСШ), де  $\mathbf{T}$  – несингулярна матриця [2]. При цьому ЛЕАР розглядається як така, що містить дві підрешітки [1]. Матриці ВВ підпросторів сигналів підрешіток  $\mathbf{E}_{s2}$  та  $\mathbf{E}_{s1}$  пов'язані через деяку матрицю  $\boldsymbol{\Xi} = \mathbf{T}^{-1}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{T}$ , тобто  $\mathbf{E}_{s2} = \mathbf{E}_{s1}\boldsymbol{\Xi}$ . Матриця  $\boldsymbol{\Phi}$  визначається рівнянням  $\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_1\boldsymbol{\Phi}$ , де  $\mathbf{A}_1$  та  $\mathbf{A}_2$  – матриці векторів фазування для першої та другої підрешіток. Рішення рівняння  $\mathbf{E}_{s2} = \mathbf{E}_{s1}\boldsymbol{\Xi}$  можна отримати методом найменших квадратів (LS), узагальнених (TLS- Total Least Squares) та структурованих узагальнених найменших квадратів (structured TLS) [5].

Запропонований варіант використання оцінки теплицевої КМ та традиційної оцінки КМ разом з методами СА включає наступні кроки:

*Крок 1.* По  $N$  вибірках, що навчають, отримати оцінку  $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)$  апіорі невідомої КМ  $\mathbf{R}$ .

*Крок 2.* Оцінити число гармонічних компонент сигналу [1].

*Крок 3.* Знайти оцінки кутових координат ДВ методом ESPRIT і перевірити гіпотезу  $H$ . У випад-

ку її прийняття обчислення завершуються. Перейти до кроку 5. Якщо гіпотеза не прийнята, то перейти до наступного кроку.

**Крок 4.** Обчислити оцінку тепліцевої КМ за рахунок використання методу LRA. Знайти оцінки кутових координат джерел випромінювання методом ESPRIT.

**Крок 5.** Стоп.

Зазначимо, що  $\hat{\mathbf{R}}$  для випадку пеленгації джерел шумового випромінювання та при  $N > M$  є максимально правдоподібною оцінкою невідомої КМ. При оцінюванні числа джерел можуть бути використані підходи, пов'язані з кругами Гершгоріна [1, 5].

Експериментальне дослідження отриманого методу оцінювання кутових координат ДВ проведено методом математичного моделювання.

У ході моделювання оцінювалася точність пеленгації джерел випромінювання залежно від ВСШ, числа вибірок, що навчають. Передбачалася наявність двох рівнопотужних джерел з кутовими координатами  $\theta_1 = 20^\circ, \theta_2 = 24^\circ$ . Число антенних елементів ЛЕАР  $M = 16$  і рознесення за кутовою координатою менше половини ширини діаграми спрямованості. Число вибірок даних у першому випадку приймалося рівним  $N = 30$  і  $N = 50$  в другому, число випробувань  $L = 500$ . Під ВСШ розумілася величина  $10 \log(\sigma_s^2 / \sigma^2)$ , де  $\sigma_s^2$  – потужність джерела випромінювання. СКП оцінок кутових координат усереднювалася по джерелах випромінювання. В ході моделювання при визначенні секторів локалізації ДВ враховувалися результати [6].

Порівнювалася ефективність методу LS-ESPRIT, що використовує традиційну оцінку КМ, методу LS-ESPRIT, що використовує метод LRA, та запропонованого підходу. Результати моделювання приведені на рис. 1.

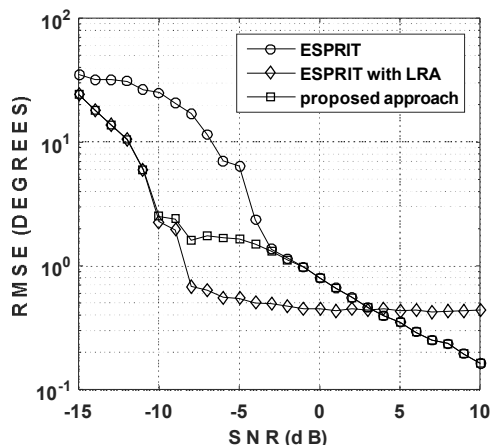


Рис. 1. СКП оцінювання кутових координат ДВ,  $N = 30$

З аналізу рис. 1 видно, що використання оцінки тепліцевої КМ характеризується високою точністю оцінювання кутових координат ДВ в умовах порогового ВСШ (в даному випадку -3дБ) та постійністю СКП оцінювання в умовах середніх та високих ВСШ.

Запропонований підхід (proposed approach) дозволяє поєднати переваги використання оцінки тепліцевої КМ та традиційної оцінки КМ

У другому випадку число вибірок було збільшено до  $N = 50$ .

Результати відповідного моделювання приведені на рис. 2.

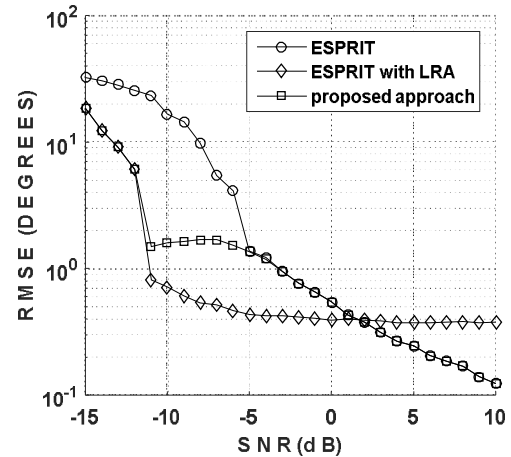


Рис. 2. СКП оцінювання кутових координат ДВ,  $N = 50$

Характер залежностей при цьому не змінюється. Проте порогове ВСШ змістилося в сторону більш низьких значень ВСШ (-5дБ для випадку використання традиційної оцінки КМ). Аналіз залежностей, наведених на рис. 1 та 2 дозволяє зробити висновок, що до напрямків подальших досліджень слід віднести пошук підходів, що дозволять ще більше наблизити точність оцінювання кутових координат пропонуемого підходу до точності, яка отримується при використанні оцінки тепліцевої КМ, при середніх ВСШ.

## Висновки і напрямки подальших досліджень

З метою врахування переваг використання оцінки тепліцевої КМ та підвищення ефективності СА в роботі запропоновано використання такої оцінки в умовах порогового ВСШ та традиційної оцінки КМ при середніх та високих КМ.

Запропонований підхід дозволяє уникнути ефекту насичення середньоквадратичної похибки оцінювання, який має місце при використанні оцінки тепліцевої КМ. В роботі така оцінка отримується з використанням методу LRA [3, 5]. Особливістю даного методу є простота оцінки тепліцевої КМ, проте вона не є оптимальною. Тому до напрямків подальших досліджень відноситься використання інших оцінок тепліцевої КМ. Доцільний пошук інших шляхів переходу від використання однієї оцінки КМ до іншої.

Крім того, викликає інтерес застосування запропонованого підходу для вирішення задачі виявлення аномалій інформаційних процесів телекомунікаційних мереж, при оцінюванні стану каналу зв'язку, методах стеганографії.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ермолаев В. Т. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи: Монография / В. Т. Ермолаев, А. Г. Флакман. — Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. — 368 с.
2. Бакулин М. Г. Технология ММО: принципы и алгоритмы / М. Г. Бакулин, Л. А. Варукина, В. Б. Крейнделин. — М.: Горячая линия-Телеком, 2014. — 244с.
3. Linebarger D. A. The effect of spatial averaging on spatial correlation matrices in the presence of coherent signals / D. A. Linebarger, D. H. Johnson // IEEE Trans.on ASSP. —1990. —Vol. 38, No. 5. —P. 880-884.
4. Семеняка А. В. О методах оценивания теплицевых корреляционных матриц в задачах адаптивной пространственно-временной обработки сигналов / А. В. Семеняка, Д. С. Рачков, Д.И. Леховицкий // Прикладная радиоэлектроника: науч.-техн. журнал. — 2011. — Т. 10, № 4. — С. 441–447.
5. Васишлин В. И. Предварительная обработка сигналов с использованием метода SSA в задачах спектрального анализа / В.И. Васишлин // Прикладная радиоэлектроника: науч.-техн. журнал. — 2014. — Том 13, № 1. — С. 43–50.
6. Васишлин В. И. Комбинированная пеленгация источников шумового излучения с использованием псевдошумового разномножения выборки / В. И. Васишлин // Системи обробки інформації.— Х.: ХУПС, 2017. — Вип. 1 (147). — С. 50–53
7. Vallet P. Toeplitz rectification and DOA estimation with MUSIC / P. Vallet, P. Loubaton // Proc. of 2014 IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP). —2014. — P. 2237-2241.
8. Gorokhov A. Unified analysis of DOA estimation algorithms for covariance matrix transforms / A. Gorokhov, Yu. Abramovich, J.F. Böhme // Signal Processing. —1996.—Vol 55.— P. 107-115

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. В. Павліков,

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "ХАІ", Харків

Received (Надійшла) 11.07.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2019

### Спектральный анализ методом ESPRIT с использованием оценки теплицевой корреляционной матрицы

В. И. Васишлин, В. Д. Луныка, В.П. Коцюба

**Предметом изучения** в статье есть методы спектрального анализа, методы оценивания теплицевых корреляционных матриц. **Цель данной статьи** – повышение эффективности спектрального анализа (уменьшение среднеквадратичной погрешности оценивания угловых координат источников излучения) в условиях порогового отношения сигнал- шум (ОСШ) с сохранением заданной эффективности при высоких и средних ОСШ. Используемыми методами есть: методы спектрального анализа, методы цифрового статистического моделирования. **Результаты.** Для обеспечения высокой точности оценивания угловых координат источников излучения при использовании линейной антенной решетки и современных методов спектрального анализа предлагается в условиях порогового ОСШ использовать оценку теплицевой корреляционной матрицы, получаемой методом LRA. Во избежание эффекта постоянности среднеквадратичной погрешности оценивания угловых координат при средних и высоких ОСШ в таких условиях предлагается использовать традиционную оценку КМ. **Выводы.** Проведенное исследование показало, что использование предложенного подхода позволяет повысить точность оценивания угловых координат источников излучения в условиях порогового ОСШ и избежать эффекта постоянности СКО оценивания при средних и высоких ОСШ за счет использования традиционной оценки КМ, которая при пеленгации источников шумового излучения является максимально правдоподобной оценкой неизвестной КМ. Указанные результаты кроме рассмотренного случая пеленгации источников излучения могут быть использованы при оценивании состояния канала связи и в ряде других случаев. Направлением дальнейших исследований являются использование других методов оценивания теплицевой КМ, поиск путей уменьшения различия в точности оценивания предложенным методом от случая использования теплицевой оценки КМ в условиях средних ОСШ.

**Ключевые слова:** теплицева корреляционная матрица, максимально правдоподобная оценка корреляционной матрицы, спектральное разложение матрицы, методы спектрального анализа.

### Spectral analysis by ESPRIT method using estimate of toeplitz correlation matrix

V. Vasylyshyn, V. Luniaka, V. Kotsiuba,

The **subject matter** of the article is the spectral analysis methods, the methods of toeplitz matrix estimation. The **goal** is to improve the performance of spectral analysis (reduction of RMSE of angular coordinates of emitting sources or direction of arrival estimation (DOA) of emitting source signals) in the case of threshold SNR's with saving the efficiency at high and medium SNRs. The used **methods** are: methods of spectral analysis, method of simulation. The following **results** were obtained. It is proposed to use the estimate of toeplitz covariance matrix obtained by LRA method to supply the high accuracy of DOA estimation of emitting source signals with uniform linear array and modern methods of spectral analysis in the conditions of threshold SNR. In order to avoid the constancy effect of RMSE of DOA estimation in the case of medium and high SNR the usual CM estimate is used. **Conclusions.** The conducted investigation shows that using of proposed approach allows to improve the accuracy of DOA estimation in the conditions of threshold SNR estimate and avoid the effect of constancy of RMSE in the case of medium and high SNR by using traditional estimate of CM. In the case of DOA estimation of jammer signals this estimate is maximum likelihood estimate of unknown CM. The presented results besides of the considered case of DOA estimation can be used for channel sounding and others applications. The future investigations are related with using other methods of toeplitz matrix estimation. Furthermore, the search of ways of reduction of the difference in estimation accuracy by proposed method as compared to the case of using the estimate of toeplitz CM in the case of medium SNR.

**Keywords:** toeplitz correlation matrix, ML estimate of covariance matrix, spectral decomposition, spectral analysis methods.

В. Д. Карлов<sup>1</sup>, О. Л. Кузнецов<sup>1</sup>, А. М. Артеменко<sup>2</sup>, А. Д. Карлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup> Генеральний штаб Збройних Сил України, Київ, Україна

## ЗНИЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ПАЧКИ РАДІОІМПУЛЬСІВ ВНАСЛІДОК ВПЛИВУ УМОВ ЇЇ ПОШИРЕННЯ І ВІДБИТТЯ

У статті оцінюється точність вимірювання частоти пачки для випадку узгодженої обробки без врахування фазових флуктуацій. Наведено результати експерименту по визначенню статистичних характеристик радіолокаційних сигналів, відбитих від місцевих предметів, розташованих за межами дальності прямої видимості, при поширенні радіохвиль в умовах аномальної рефракції над морем. Отримані гістограми розподілу початкової фази відбитого сигналу РЛС апроксимовані кривою, що відповідає нормальному закону розподілу, а нормована кореляційна функція має осцилюючий характер. Оцінювання частоти радіолокаційного сигналу здійснюється за критерієм максимуму натурального логарифма відношення правдоподібності. В явному вигляді отримано достатню статистику за наявності фазових флуктуацій. Результати вказують на те, що для сучасних РЛС в умовах регулярного вимірювання, на точність оцінювання частоти пачки радіоімпульсів в значно більшому ступені впливають статистичні характеристики флуктуації фаз ніж відношення сигнал-шум.

**Ключові слова:** радіолокаційне спостереження, когерентно-імпульсна РЛС, пачка радіоімпульсів, фазові флуктуації, гаусівський шум.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Виконання сучасними аеродинамічними цілями завдань за призначенням на малих та гранично малих висотах з огинанням рельєфу місцевості та зростання їхніх маневрених можливостей обумовлює необхідність оцінювання радіолокаторами різних класів похідних дальності до цілі з максимально високою точністю.

Для рішення задачі визначення похідних дальності за часом з необхідною точністю протягом часо-частотної обробки радіолокаційного сигналу, в когерентно-імпульсних РЛС використовується когерентна пачка радіоімпульсів.

Реальні умови поширення та відбиття даного радіолокаційного сигналу здатні суттєво обмежувати його часову когерентність та якість його часо-частотної обробки.

Такими умовами можна вважати: вплив атмосферних неоднорідностей [1-3], доплерівський шум цілі [4-6] та відбиття радіохвиль від земної поверхні зі складним рельєфом місцевості або схвильованої поверхні моря [7-9].

Ступінь когерентності пачки визначає тривалість її закономірної фазової структури і, як слід, міру роздільної здатності РЛС за частотою та точність вимірювання частоти вказаного радіолокаційного сигналу.

Оцінка можливого зниження точності вимірювання частоти пачки за рахунок фазових флуктуацій її радіоімпульсів дозволить визначати умови доцільності оптимізації її обробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вдосконалення та розвиток сучасних аеродинамічних об'єктів радіолокаційного спостереження обумовлюють підвищення вимог до засобів їх виявлення та супроводження. В сучасних когерентно-імпульсних РЛС, які забезпечують радіолокаційне спостереження складних маневруючих цілей в складній цільовій та завадовій обстановці, реалізовані

алгоритми цифрового когерентного накопичення прийнятого пачкового радіосигналу. Тому, має практичну користь оцінювання помилок вимірювання частоти прийнятої пачки в залежності від статистичних характеристик фазових флуктуацій її радіоімпульсів.

Радіолокаційному спостереженню цілей та вимірюванню їх координат й параметрів руху в складних умовах присвячена значна кількість робіт.

Флуктуації фази, що виникають внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та особливості застосування радіотехнічних систем в цих умовах описані в роботах [1, 7, 10, 12]. Окрім цього, фазові викривлення прийнятого сигналу, які обумовлені складною формою цілі та її здатністю до виконання раптового маневру, викликають блукання її радіолокаційного центру та, як слід, появу швидкісних шумів цілі [1, 4, 5, 13, 14].

У випадку багатотрасового поширення радіолокаційного сигналу при радіолокаційному спостереженні цілей, що рухаються під малими кутами місця, також з'являються його додаткові фазові викривлення, що розглядаються у [4, 7, 8, 15-19].

У [20] наведена методика розрахунку помилки вимірювання частоти пачки, що виникає внаслідок впливу фазових флуктуацій її радіоімпульсів.

Як показано в роботі [21], можливі значення помилок вимірювання часо-частотних параметрів радіолокаційного сигналу, які виникають внаслідок його фазових спотворень здатні перевищувати допустимі значення РЛС різних діапазонів довжин хвиль. Припущення щодо статистичних характеристик відбитих сигналів підтверджені результатами експериментального дослідження, які висвітлені в [22].

**Метою статті** є чисельний аналіз впливу статистичних характеристик фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки зі знакозмінною кореляційною функцією на зниження точності вимірювання її частоти.

### Основний матеріал

Прийнята реалізація представляє собою суму відбитої від цілі пачки радіоімпульсів та внутрішнього шуму приймального пристрою

$$y(t, \Omega) = x(t, \Omega) + n(t), \quad (1)$$

де  $y(t, \Omega)$  – реалізація прийнятого коливання;  $x(t, \Omega)$  – реалізація корисного сигналу;  $n(t)$  – реалізація внутрішнього гаусівського шуму;  $\Omega$  – циклічний зсув частоти прийнятої пачки радіоімпульсів.

Корисним сигналом є когерентна пачка радіоімпульсів з випадковою амплітудою і початковою фазою, комплексна амплітуда якої описується як

$$\dot{X}(t, \Omega) = b \sum_{i=1}^n \dot{X}_i(t, \Omega) \exp[j(\beta)], \quad (2)$$

де  $\dot{X}_i(t, \Omega)$  – комплексна амплітуда  $i$ -го радіоімпульсу;  $b$  – випадкова амплітуда радіосигналу, яка розподілена за законом Релея;  $\beta$  – випадкова початкова фаза радіосигналу, яка розподілена за рівномірним законом;  $i$  – номер радіоімпульсу, який відлічується від початку пачки;  $n$  – кількість радіоімпульсів в пачці.

Згідно [1] визначено, що оцінювання зсуву частоти пачки радіоімпульсів може бути здійснено шляхом знаходження аргументу максимуму натурального логарифму відношення правдоподібності

$$\hat{\Omega} = \arg \max \ln \ell(\Omega). \quad (3)$$

де  $\ell(\Omega)$  – відношення правдоподібності, як функція вимірюваного параметра.

В роботі [1] визначено, що відношення правдоподібності для когерентного сигналу з рівномірно розподіленою випадковою фазою й випадковою амплітудою, розподіленою за законом Релея, як результат статистичного усереднення за випадковими параметрами  $b$  і  $\beta$  має вигляд

$$\ell(\Omega) = \frac{1}{1+q^2/2} \exp \frac{q^2/2}{2(1+q^2/2)} |Z_n(\Omega)|^2, \quad (4)$$

де  $q^2$  – відношення сигнал-шум за потужністю;  $|Z_n(\Omega)|^2$  – квадрат модулю нормованого вагового інтеграла як функція вимірюваного параметра.

В умовах регулярного вимірювання ( $q^2 \gg 1$ ) справедливою є рівність

$$|Z_n(\Omega)| = |Z_n(\vec{\Phi}_c, \vec{\Phi}_o)| \approx q\rho(\vec{\Phi}_c, \vec{\Phi}_o) = q\rho(\Omega), \quad (5)$$

де  $\vec{\Phi}_c = \|\Phi_{ci}\|^T$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) – вектор спостережуваних значень початкових фаз радіоімпульсів пачки;  $\vec{\Phi}_o = \|\Phi_{oi}\|^T$  – вектор очікуваних значень початкових фаз радіоімпульсів пачки;  $\rho(\vec{\Phi}_c, \vec{\Phi}_o) = \rho(\Omega)$  – нормована функція розузгодження за початковою фазою спостережуваного та очікуваного радіосигналу.

З урахуванням (5) відношення правдоподібності (4) при  $q^2 \gg 1$  приймає вигляд

$$\ell(\Omega) \approx 2/q^2 \exp q^2 \rho^2(\Omega)/2. \quad (6)$$

Як показано в [20], у випадку когерентної пачки з постійним періодом слідування радіоімпульсів квадрат нормованої функції розузгодження за частотою описується виразом

$$\begin{aligned} \rho^2(\Omega) = & 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (\Phi_i - \Phi_j)^2 - \\ & - \frac{1}{2} T^2 \Omega^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i-j)^2 + \\ & + T\Omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i-j) (\Phi_i - \Phi_j), \end{aligned} \quad (7)$$

де  $\Omega = \omega - \omega_0$  – розузгодження між очікуваною  $\omega$  й спостережуваною  $\omega_0$  циклічними частотами пачки імпульсів;  $i, j$  – номери імпульсів, які відлічуються від початку пачки;  $\Phi_i, \Phi_j$  – спостережувані значення початкової фази  $i$ -го і  $j$ -го радіоімпульсів відповідно;  $\xi_i = \frac{Z_i}{Z_\Sigma}$ ;  $Z_i = \frac{1}{2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{Y}_i(t) \dot{X}_i^*(t) dt \right|$  – модуль сигнальної частини комплексного кореляційного інтеграла для  $i$ -го радіоімпульсу;  $\dot{Y}_i(t)$  – комплексна обвідна прийнятого  $i$ -го радіоімпульсу;  $\dot{X}_i^*(t)$  – комплексно спряжена обвідна опорної напруги при обробці  $i$ -го радіоімпульсу;  $Z_\Sigma = \sum_{i=1}^n Z_i$ ;  $T$  – період слідування радіоімпульсів пачки.

Для симетричного амплітудного розподілу радіоімпульсів в пачці  $\xi_i = \xi_{n+1-i}$ , підставляючи вираз (7) у вираз (6), логарифмуючи й залишаючи тільки залежні від вимірюваних параметрів доданки, одержуємо вираз для достатньої статистики

$$\begin{aligned} S(\Omega) = & -\frac{q^2}{2} \left\{ \frac{T^2}{2} \Omega^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i-j)^2 - \right. \\ & \left. - T\Omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i-j) (\Phi_i - \Phi_j) \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Дисперсія помилки оцінювання частоти пачки радіоімпульсів отримується [1] за виразом

$$\frac{1}{\sigma_\Omega^2} = -\frac{d^2 \ln \ell(\Omega)}{d\Omega^2} = -\frac{d^2 S(\Omega)}{d\Omega^2} \text{ при } \Omega = \hat{\Omega}, \quad (9)$$

де  $\ln \ell(\Omega)$  – натуральний логарифм відношення правдоподібності (6) або його достатньої статистики (8);  $\hat{\Omega}$  – оцінка частоти пачки радіоімпульсів.

Після дворазового диференціювання по вимірюваному параметру достатньої статистики (8) одержуються дисперсія помилки оцінювання частоти

$$\frac{1}{\sigma_{\Omega}^2} = \frac{q^2 T^2}{2} \sum_{j=1}^m \xi_j (2j-1)^2, \quad (10)$$

де  $R_j$  - різниця початкових фаз  $j$ -ої симетричної пари радіоімпульсів;  $m$  – число пар радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки. Якщо пачка радіоімпульсів має прямокутну, обвідну ( $\xi_j = 1/n$ ), вираз (10) можна перетворити до вигляду

$$\frac{1}{\sigma_{\Omega}^2} = \frac{q^2 (4m^2 - 1) T^2}{12}. \quad (11)$$

Дисперсія випадкової помилки виміру частоти, обумовленої флуктуаціями початкових фаз імпульсів пачки може бути представлена виразом [20]

$$\sigma_{\Omega_{фл}}^2 = \frac{9}{m^2 (4m^2 - 1)^2 T^2} \left\langle \left[ \sum_{j=1}^m (2j-1) \Delta R_j \right]^2 \right\rangle. \quad (12)$$

де  $\langle \rangle$  - операція статистичного усереднення.

Дисперсія загальної помилки вимірювання частоти пачки радіоімпульсів визначається сумою дисперсії  $\sigma_{\Omega}^2$  помилки (11) обумовленої впливом внутрішніх шумів приймального пристрою й дисперсії  $\sigma_{\Omega_{фл}}^2$  помилки (12), викликаної фазовими флуктуаціями радіоімпульсів пачки

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{\Omega}^2 + \sigma_{\Omega_{фл}}^2. \quad (13)$$

Вважається, що фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом, а кореляція фазових флуктуацій радіоімпульсів пачки убуває від імпульсу до імпульсу за знакозмінним законом. Вказані припущення підтверджуються результатами експерименту, наведеними у [22]. При його проведенні, у якості радіолокаційного вимірювача було використано розташовану на узбережжі Азовського моря РЛС 35Д6Д. В ході експерименту вказана когерентно-імпульсна РЛС використовувалася у 4-му режимі огляду простору при рідкому запуску (частота повторення зондуючих сигналів складала 690...820 Гц).

Для статистичного аналізу було використано 4984 значення напруги у квадратурних каналах РЛС. На рис. 1 наведено гістограма розподілу початкової фази відбитого сигналу. Плавна крива, яка апроксимує цей розподіл та позначена цифрою 1 відповідає нормальному закону.

На рис. 2 наведено результати кореляційного аналізу даних експерименту. Пунктирною лінією позначена нормована кореляційна функція  $R_{\phi}(\tau)$  фази відбитого сигналу. Як можна побачити функція  $R_{\phi}(\tau)$  має осцилюючий характер.

Таким чином, в умовах аномальної рефракції при поширенні електромагнітних хвиль над морем амплітуда та початкова фаза радіолокаційних сигналів розподілені за нормальним законом. При цьому, нормована кореляційна функція фази відбитого сигналу має осцилюючий характер.

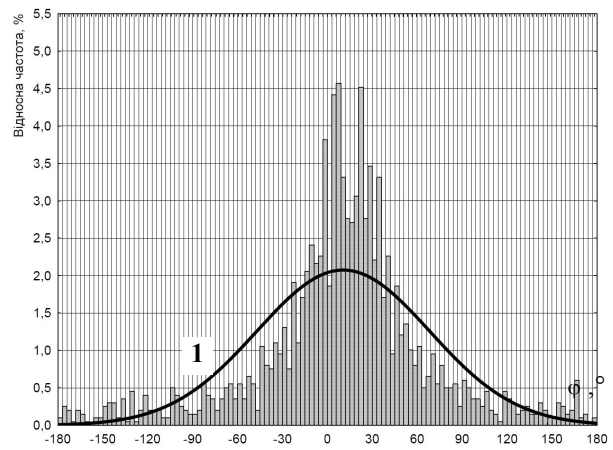


Рис. 1. Гістограма і графік функції розподілу фази

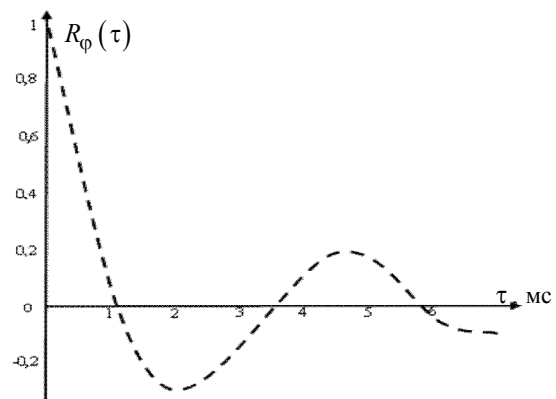


Рис. 2. Нормована кореляційна функція фази відбитого сигналу

Відповідно до результатів експерименту, з урахуванням частоти слідування радіоімпульсів пачки когерентно-імпульсної РЛС, можна вважати, що кореляція відбитого пачкового радіосигналу від імпульсу до імпульсу убуває за знакозмінним законом.

Реалізація статистичного усереднення (12) дозволяє отримати вираз дисперсії загальної помилки вимірювання частоти пачки радіоімпульсів при знакозмінній кореляційній функції фазових флуктуацій

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \frac{12}{q^2 T^2 (4m^2 - 1)} + \frac{18\sigma_{\phi}^2}{m^2 T^2 (4m^2 - 1)^2} \times \left[ \sum_{k=1}^m \left( (2k-1)^2 (1 - (-a)^{(2k-1)}) \right) + 2 \times \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{i=1}^{m-k} (-a)^i (2k-1)(2k+2i-1)(1 - (-a)^{(2k-1)}) \right], \quad (14)$$

де  $\sigma_{\phi}^2$  - дисперсія фазових флуктуацій;  $a$  - коефіцієнт кореляції фазових флуктуацій сусідніх радіоімпульсів пачки.

Нижче наданні графіки залежності  $(\sigma_{\Sigma} T)^2$  від відношення сигнал-шум по потужності  $q^2$  при  $a=0,99$  (рис. 3, а) та від коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій (рис. 3, б) при  $q^2 = 1000$ . Графіки отримані для значень дисперсії фазових флуктуацій  $\sigma_{\phi}^2 = 0,01; 0,1; 1; 10 \text{ рад}^2$ .

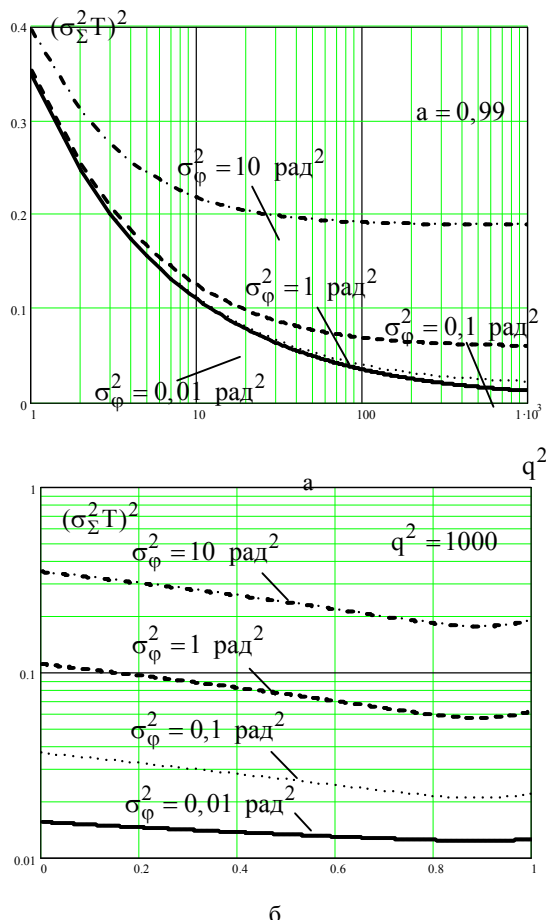


Рис. 3. Дисперсія помилки вимірювання частоти пачки радіоімпульсів при відсутності врахування фазових флуктуацій

Результати наведені на рис. 3, а вказують на те, що в умовах регулярного вимірювання (при  $q^2 \gg 1$ ), точність вимірювання частоти пачки радіоімпульсів

переважно залежить від статистичних характеристик фазових флуктуацій ніж від величини відношення сигнал-шум. Збільшення дисперсії фазових флуктуацій на порядок в області малих значень ( $\sigma_\phi^2 = 0,01 \dots 0,1 \text{ рад}^2$ ) майже не впливає на зміну величини дисперсії помилки вимірювання частоти пачки радіоімпульсів. Збільшення даної дисперсії на порядок в області суттєвих значень ( $\sigma_\phi^2 = 1 \dots 10 \text{ рад}^2$ ), які можуть мати місце в практичних випадках, призводить до зростання дисперсії помилки вимірювання частоти пачки радіоімпульсів на порядок і більше. Дані результати отримані для знакозмінної кореляційної функції фазових флуктуацій, при зменшенні коефіцієнта міжімпульсної кореляції лише на 1% ( $a = 0,99$ ).

Графіки на рис. 3,б вказують на те, що при збільшенні дисперсії фазових флуктуацій ( $\sigma_\phi^2 = 0,01 \dots 10 \text{ рад}^2$ ), збільшується вплив коефіцієнту їх міжімпульсної кореляції на помилку вимірювання частоти пачки радіоімпульсів. Причому найбільш суттєво цей ефект має місце при великих величинах дисперсії фазових флуктуацій ( $\sigma_\phi^2 = 1 \dots 10 \text{ рад}^2$ ), що дійсно може мати місце в реальних умовах виконання РЛС завдань за призначенням.

## Висновки

Експериментальні дані вказують, що при роботі когерентно-імпульсної РЛС в реальних умовах, має місце виникнення флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки з нормальним законом розподілу та знакозмінною кореляційною функцією. Дані флуктуації в значному ступені здатні знизити якість часо-частотної обробки радіолокаційного сигналу, що вказує на необхідність її оптимізації.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Довідник учасника АТО: озброєння і військова техніка Збройних Сил Російської Федерації / А.М. Алімпієв, Г.В. Певцов, Д.А. Гриб та ін.; за заг. ред. А.М. Алімпієва. – Х.: Оригінал, 2015. – 732 с.
2. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М: Сов. радио, 1970. – 383 с.
3. Карлов В.Д. Влияние среды распространения радиоволн на приморском направлении при измерении угловых координат радиолокационных целей / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, В.В. Челпанов, К.П. Квиткин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – № 3 (25). – С. 51-53.
4. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Сколника. – М: Сов. радио, 1976, Т 1. – 456 с.
5. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р. В. Островитянов. – М: Радио и связь, 1982. – 232 с.
6. Обнаружение аэродинамических целей в условиях шумовых и пассивных помех с широким доплеровским спектром / В.Д. Карлов, И.Г. Леонов, А.Е. Присяжный, О.Я. Луковский // Системи обробки інформації. – 2006. – № 9(58). – С. 34-36.
7. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк – М: Радио и связь, 1988. – 223 с.
8. Котов А.Ф. Влияние отражений от подстилающей поверхности на процесс локации объектов // Теория и практика систем синхронизации / Московский институт радиотехники электроники и автоматики. – 1992. – С.4-8.
9. Карлов В.Д. Влияние неоднородностей рельефа позиции радиолокационной станции на эффективность подавления внешней помехи при локации надводных целей / В.Д. Карлов, Н.Н. Минервин, Н.Н. Петрушенко, Е.В. Лукашук // Системи управління навігації та зв'язку. – 2008. – № 4 (8). – С. 34-36.
10. Петрушенко М. М. Особливості застосування радіотехнічних систем Повітряних Сил в нестабільних гідрометеорологічних умовах / М. М. Петрушенко // Системи управління навігації та зв'язку. – 2009. – № 2 (10). – С. 54-57.
11. Карлов В.Д. Влияние флуктуаций фронта помеховой волны на эффективность её подавления корреляционным компенсатором в радиотехнических системах приморского базирования / В.Д. Карлов, Н.Н. Минервин, Н.Н. Петрушенко, Е.В. Лукашук, О.Я. Луковский // Системи обробки інформації. – 2008. – № 7 (74). – С. 87-93.
12. Карлов В.Д. До питання про вимірювання дальності маловисотної цілі при її радіолокації в межах тропосферного хвилеводу над морем / В.Д. Карлов, Д.Б. Кучер, О.В. Струцинський, О.В. Лукашук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 3 (24). – С. 98-101.

13. Карлов В.Д. К вопросу о измерении доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем / В.Д. Карлов, А.П. Кондратенко, А.К. Шейгас, Ю.Б. Ситник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1 (14). – С. 115-117.
14. Карлов В.Д. Особливості вимірювання радіальної складової швидкості цілі, лоцуючої під малими кутами місця над морем / В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, Г.В. Певцов, А.І. Нос // Новітні технології-для захисту повітряного простору: зб. тез доповідей Восьмої наукової конференції ХУПС. 18–19 квітня 2012 р. – Харків, 2012. – С. 295.
15. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiara, O. (2018), "Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study", Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, available at: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
16. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. Studies in Systems, Decision and Control, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
17. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
18. Коваленко А. А. Подходы к синтезу информационной структуры системы управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2014. – № 1(117). – С. 180-184.
19. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
20. Минервин Н.Н. Ошибки измерения радиальной скорости и радиального ускорения цели, обусловленные неучетом флюктуаций фаз импульсов пачки / Н.Н. Минервин, А.Л. Кузнецов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія* – 2001. – № 22. – С. 288-294.
21. Мінервін М.М. Ограничение точности измерения радиальной скорости цели за счет условий распространения, отражения и обработки радиолокационного сигнала / М.М. Мінервін, О.Л. Кузнецов, В.А. Таршин // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – 2006. – № 3 (9). – С. 116-118.
22. Карлов В.Д. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. / В.Д. Карлов, А.О. Родюков, І.М. Пічугін // *Наука і техніка ПС ЗС України*. – 2015. – Вип. 4 (21). – С. 71-74.

**Рецензент:** д-р техн. наук. проф. Л. Ф. Купченко,  
Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

Received (Надійшла) 13.05.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.07.2019

#### **Снижение точности измерения частоты пачки радиоимпульсов вследствие влияния условий ее распространения и отражения**

V. D. Karlov, A. L. Kuznetsov, A. N. Artemenko, A. D. Karlov

В статье оценивается точность измерения частоты пачки для случая согласованной обработки без учета фазовых флюктуаций. Приведены результаты эксперимента по определению статистических характеристик радиолокационных сигналов, отраженных от местных предметов, расположенных за пределами дальности прямой видимости, при распространении радиоволн в условиях аномальной рефракции над морем. Полученные гистограммы распределения начальной фазы отраженного сигнала РЛС аппроксимированы кривой, соответствующей нормальному закону распределения, а нормированная корреляционная функция имеет осциллирующий характер. Оценка частоты радиолокационного сигнала осуществляется по критерию максимума натурального логарифма отношения правдоподобия. В явном виде получена достаточная статистика при наличии фазовых флюктуаций. Результаты свидетельствуют о том, что для современных РЛС в условиях регулярного измерения, на точность оценивания частоты пачки радиоимпульсов в значительно большей степени влияют статистические характеристики флюктуаций фаз чем отношение сигнал-шум.

**Ключевые слова:** радиолокационное наблюдение, когерентно-импульсная РЛС, пачка радиоимпульсов, фазовые флюктуации, гауссовский шум.

#### **Reducing the accuracy of measuring frequency of the radio pulse burst due to the influence of the conditions of its propagation and reflection**

V. Karlov, O. Kuznetsov, A. Artemenko, A. Karlov

The accuracy of the measurement of the burst frequency for case of coordinated processing without taking into account the phase fluctuations is evaluated in this article. Results are demonstrated of experiment on determination of statistical characteristics of radar's signals, reflected from local objects, located outside distance of direct visibility, at propagation of radio waves in the conditions of anomalous refraction above a sea. The obtained histograms of the distribution of the initial phase of the reflected signal of the radar are fitted with a curve corresponding to the normal distribution, and the normalized correlation function has an oscillating character. The signals at the input of the radar's receiver is an additive mixture of signals reflected from the targets, and uncorrelated Gaussian noise, that is the assumption of investigating. It is assumed, that the phase fluctuations of the received radio pulses bursts are distributed according to normal probability laws with zero mean, and correlations of phase fluctuations decrease with alternating, sign-variable laws by increasing interval between radio pulses within the bursts. The frequency of radio signal is estimated by the maximum criterion of the natural logarithm of the likelihood ratio. An explicit expression is obtained a sufficient statistics during the presence of phase fluctuations. The results show that under condition of a regular measurement, the accuracy of measuring the frequency of a burst of radio pulses is much more affected by the statistical characteristics of phase fluctuations than the signal-to-noise ratio in modern radars.

**Keywords:** radar surveillance, coherent pulse radar, burst of radio pulses, phase fluctuations, Gaussian noise.

А. П. Мусієнко<sup>1</sup>, О. А. Лаптев<sup>1</sup>, В. В. Собчук<sup>2</sup>, Б. М. Борсук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

<sup>2</sup> Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна

## МЕТОДИКА ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ВХІДНОГО СИГНАЛУ РАДІОМОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ НА БАЗІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

У статті розглянуто питання обчислення спектра радіосигналу на обмеженому часовому проміжку. Доведено, що обмеження часу аналізу рівносильне використанню прямокутної віконної функції, частотна характеристика якої має максимальні бічні пелюстки. Розроблено механізм зниження рівня бічних пелюсток шляхом згладжування віконною функцією, що у свою чергу, погіршує спектральний аналіз через розширення величини основного сигналу. Проте значно прискорює процес обробки сигналу для аналізу оператором пошукового комплексу. Використання віконних функцій в програмних продуктах пошукових комплексів значно підвищує ймовірність виявлення цифрових засобів негласного отримання інформації. Доведено неможливість створення універсального алгоритму перетворення аналогового сигналу у цифровий який би міг бути безпомилковим вхідним сигналом для створення програмного засобу автоматизованого комплексу пошуку засобів негласного отримання інформації. Розроблена методика підвищення якості використання швидкого перетворення Фур'є для апаратно програмних комплексів радіомоніторингу. Суть цієї методики у комбінованому підході до перетворення, тобто використовувати не одну віконну функцію, а більш доцільні використовувати віконні функції для кожного відрізка частотного діапазону.

**Ключові слова:** методика, радіомоніторинг, швидке перетворення Фур'є, спектр, віконні функції.

### Вступ

Останні декілька років завдання радіомоніторингу – пошуку цифрових засобів негласного отримання інформації (ЦЗНОІ) розглядалося досить часто. З появою автоматизованих програмних комплексів радіомоніторингу, які використовують в своїх алгоритмах програмного пошуку спектральний та векторний аналізи, вважалося що ця задача вирішена остаточно. Проте універсального алгоритму не існує до цих пір. З урахуванням особливості того, що у сучасному високотехнологічному світі пошук ЦЗНОІ ускладнюється факторами вдосконалення цих пристроїв. В них застосовуються складні методи та алгоритми приховання випромінювання радіозакладок, триває збільшення застосування радіоєфіру для організації зв'язку, передачі даних та команд управління (вже практично весь радіочастотний спектр задіяний під роботу легальних радіопередавачів). Питання удосконалення методики пошуку ЦЗНОІ за рахунок уточнення вхідних параметрів стає все більш важливим.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Питанням пошуку ЦЗНОІ та розробкам програмного забезпечення для застосування в автоматизованих комплексах пошуку ЦЗНОІ присвячено значну кількість публікацій. Так, у [1] розглядаються питання пошуку і локалізації радіозакладок за допомогою пошукових комплексів та допоміжних пристроїв. Приведена класифікація радіозакладок, та характерні ознаки виявлення радіозакладок. Доведено, що суттєву перевагу перед іншими отримують сканерні приймачі, які мають можливість роботи під управлінням комп'ютера. Використання зовнішнього комп'ютера з програмним забезпеченням дозволяє автоматизувати процес пошуку і виявлення закладних пристроїв. Високий ступінь автоматизації дозволяє проводити аналіз радіоелектронної обстановки по

районам контролю, вести базу радіоелектронних засобів і використовувати її для ефективного виявлення радіозакладок, в тому числі при короткочасних сеансах їх роботи. Наприклад, при використанні радіозакладок з дистанційним управлінням, проміжним накопиченням інформації та напівактивна радіозакладка. Однак ефективність пошуку визначається не тільки параметрами сканерних приймачів, але і програмним забезпеченням (ПЗ), що встановлене на зовнішньому комп'ютері. Це ПЗ не тільки керує приймачем, а й проводить попередній аналіз радіоєфіру. В умовах стрімкого розвитку обчислювальної техніки доцільно робити акцент саме на пошуковому ПЗ, яке може якісно виконувати аналіз радіосигналів тільки на основі якісних вхідних параметрів. Тобто на основі якісного перетворення аналогового сигналу у цифровий. Тому удосконалення процесу пошуку на основі перетворення Фур'є є актуальним. У [2] розглядаються питання аналізу систем радіоконтролю (радіомоніторингу) з різними технічними параметрами, які об'єднує одне – вони можуть тільки відобразити і зберегти панорами спектрів сигналів в радіоєфірі. Завдання аналізу цифрових легальних каналів зв'язку або не вирішують взагалі, або робиться це формально. Тобто знайти ЦЗНОІ окремо використані пристрої не можуть, тільки за допомогою програмних комплексів пошуку у яких головним вхідним сигналом є цифровий сигнал отриманий шляхом перетворення аналогового сигналу в цифровий за допомогою перетворення Фур'є. У [3] описані можливості основних програмних комплексів пошуку ЦЗНОІ. Наведено огляд нових версій приладів пошукових комплексів OSCOR-5000E 5.0, DigiScan EX S-Pro, ЗОДИАК II та інші.

Отже, з аналізу сучасної літератури можна зробити висновок, що програмних комплексів пошуку ЦЗНОІ існує дуже багато. Програмне забезпечення, що в них використане для аналізу цифрових пакетів,

стосовно завдань пошукового радіоконтролю постійно вдосконалюється [4-7]. Проте, універсального ПЗ зараз практично немає. Одним з шляхів удосконалення ПЗ є удосконалення вхідних параметрів – параметрів перетворення аналогових сигналів в цифрові тобто перетворення Фур'є. Виходячи з чого задача аналізу математичних похибок перетворення Фур'є та визначення шляхів їх усунення є актуальною.

### Виклад основного матеріалу

Існує велика кількість методів вдосконалення алгоритмів пошуку. Основними з них є: використання більш сучасної апаратури, застосування нових методів на основі різних варіацій спеціалізованих комплексів, вдосконалення програмного продукту та інші. В роботі проаналізовано комплекси, що працюють на основі алгоритмів, які використовують в своїй основі перетворення Фур'є. Розглянемо способи удосконалення даного алгоритму з метою найбільш ймовірного виявлення засобів негласного отримання інформації.

Практично у всіх комплексах використовується розкладання сигналу на частоти для цього застосовується перетворення Фур'є. В більшість алгоритмів цифрової обробки сигналів доводиться мати справу з деякою вибіркою даних про амплітуду сигналу в конкретний момент часу, зручно використовувати одну з численних модифікацій перетворення Фур'є – швидке перетворення Фур'є, яке також називається FFT (fast Fourier transform).

У своїй класичній інтерпретації перетворення Фур'є є сумою вигляду:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i Nkn}, \quad k=0, \dots, N-1,$$

де  $N$  – кількість компонент розкладу,  $x_n, n=0, \dots, N-1$  – значення відліку сигналу в момент часу з номером  $n$ ,  $X_k, k=0, \dots, N-1$  – вихідні значення перетворення, що представляють собою шукані значення частот,  $k$  – індекс частот. Отриманий в результаті прямого перетворення значення  $X_k$  представляють собою набір комплексних зна-

чень – пар  $\text{Re}(X_k) + i\text{Im}(X_k)$ , що характеризують амплітуду і початкову фазу гармонічного сигналу. Застосувавши до отриманих значень зворотне перетворення Фур'є ми відновимо вихідний сигнал з деякою точністю

$$X_k = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-2\pi i Nkn}, \quad k=0, \dots, N-1.$$

На практиці ж часто доводиться працювати з великими обсягами даних. Для значного прискорення обчислення використовують швидке перетворення Фур'є. FFT також працює з комплексними числами і відрізняється тим, що розмір самого перетворення обов'язково є ступенем двійки. Варіюючи розмір перетворення і величину вибірки, отримуємо наближений до значень реального сигналу набір [8].

Перетворення Фур'є будь-якого виду є складним та універсальним інструментом. Воно сильно залежить від даних, які йому поставляються. Неперервне перетворення Фур'є є розвитком більш узагальненої ідеї рядів Фур'є. Результуючим значенням частот якого є комплексні числа. Реалізацією класичного прямого перетворення Фур'є буде інтеграл на нескінченному проміжку, для дискретного перетворення – це нескінченна сума ряду

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ix\omega} dx.$$

Про справедливість рівності правої і лівої частин ми можемо говорити тільки в тому випадку, коли вихідна функція є функцією нескінченної довжини, тобто коли перед нами представлений нескінченний сигнал. На практиці такі сигнали зустрічаються не часто.

Для візуального визначення похибки перетворення Фур'є створимо штучний сигнал, частоти 440 Гц і 3440 Гц. Пропустимо його через пряме перетворення Фур'є, а потім через зворотне і представимо результати в графічному вигляді. Бачимо, що вихідний сигнал ( $x$ ) і сигнал, отриманий зворотним перетворенням ( $z_1$ ) різний [9] (рис. 1).

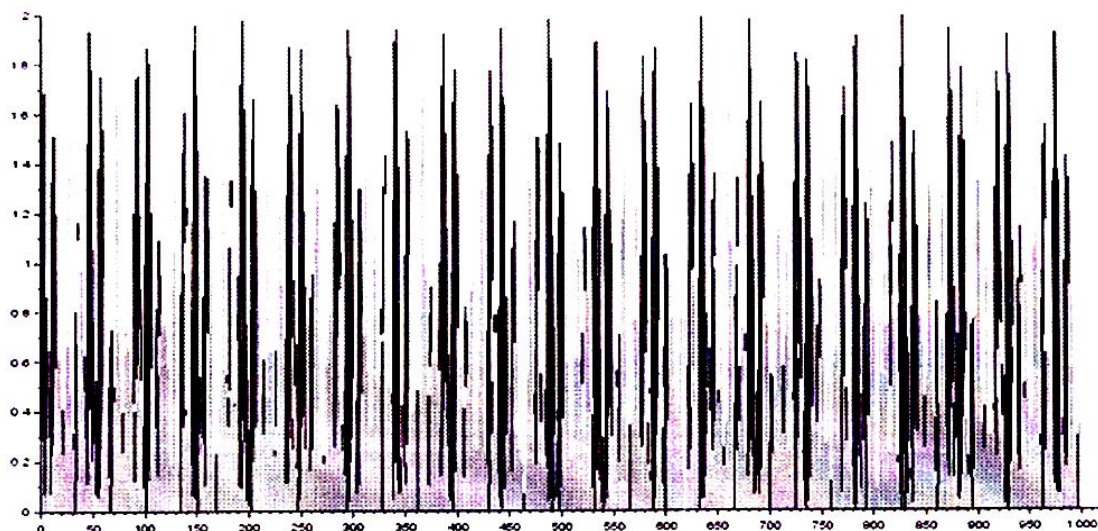


Рис. 1. Графік функції вихідного сигналу  $x$  (темний тон) і відновленого сигналу  $z_1$  (сірий тон)



Тобто при сигналі обмеженому в часі спостерігається видимість відхилення від функцій прямого і зворотного перетворення Фур'є. Що змушує шукати способи зменшення помилки. Оскільки перетворення сигналу в частотне представлення за допомогою FFT проводиться тільки блоками, у кожного такого блоку ми можемо збільшити частоту дискретизації, тим самим збільшивши розмір FFT блоку і, відповідно, кількість коефіцієнтів перетворення. Це дасть нам більш точний частотний результат на одиницю часу. Проте як би ми не наближали довжину проміжку до нескінченності, неточності все одно будуть мати місце. FFT не знає нічого про вихідні гармоніки функції. У нашому випадку, була частота в 440 Гц, а FFT перетворив її в набір гармонік з перекрученими частотами, хоч і близькими за значенням до вихідної. Тому отримані значення сигналу є лише близькими до первісного [10]. Щоб ліквідувати спотворення пошукові комплекси використовують обмежені інтервали аналізу і при необхідності програмним засобом об'єднують їх в єдиний спектр.

Розглянемо принцип такого перетворення (спектр обмеженого в часі сигналу). Нехай сигнал  $S_0(t)$  нескінченний в часі. У найпростішому випадку ми можемо представити цей сигнал як гармонійне коливання з частотою  $\omega_0$ . Перетворення Фур'є цього сигналу буде являти собою дельта-імпульс на частоті сигналу, тобто  $S_0(\omega) = \delta(\omega - \omega_0)$ . Вихідний сигнал і його спектр показані на рис. 2.

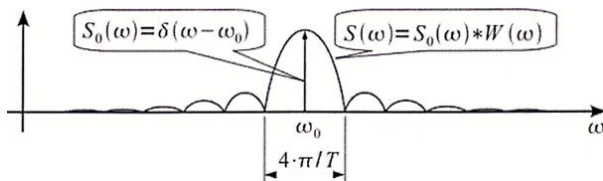


Рис. 2. Вихідний сигнал і його спектр

На практиці ми не можемо розрахувати спектр шляхом чисельного інтегрування по всій осі часу. За винятком коли ми можемо отримати аналітичний вираз для спектра сигналу, як в наведеному прикладі, тому ми зафіксуємо інтервал часу  $T$  на якому будемо розраховувати спектр сигналу. Таким чином ми отримаємо сигнал  $S(t)$ , який збігається з вихідним на інтервалі часу  $T$ , але поза інтервалом спостереження вважаємо  $S(t) = 0$ . Математично,  $S(t)$  можна представити як добуток вихідного нескінченного сигналу  $S_0(t)$  і прямокутного імпульсу  $w(t)$  тривалістю  $T$ :  $S(t) = S_0(t) \cdot w(t)$ . Спектр сигналу  $S(t)$ , згідно з властивостями перетворення Фур'є буде дорівнювати згортці спектрів вихідного сигналу і спектра  $W(\omega)$  прямокутного імпульсу  $w(t)$ :

$$S(\omega) = S_0(\omega) \cdot W(\omega) = \delta(\omega - \omega_0) \cdot W(\omega) = W(\omega - \omega_0). \quad (1)$$

У виразі (1) використано фільтруючу властивість дельта-функції. Сигнал  $S(t)$  і його спектр  $S(\omega)$  показані на рис. 3.

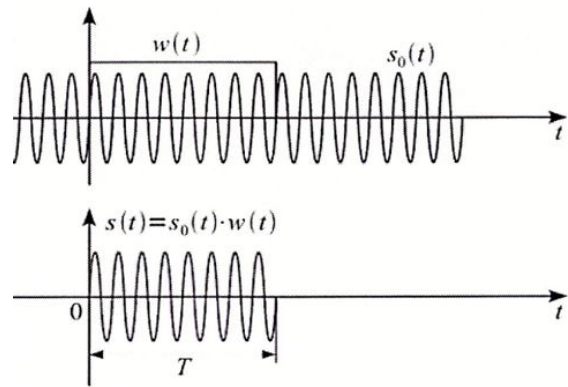


Рис. 3. Спектр обмеженого в часі сигналу

Таким чином, замість дельта-імпульсу спектр  $S(\omega)$  перетворився в функцію типу  $\sin x/x$ . Спектр прямокутного імпульсу функції  $w(t)$  у якому ширина пелюстки залежить від тривалості інтервалу аналізу, як це наочно показано на рис. 4.

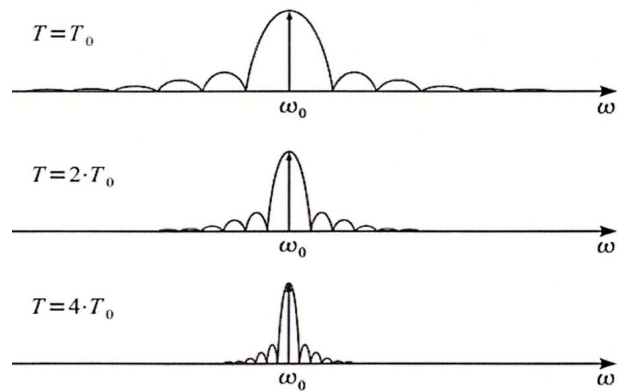


Рис. 4. Зміна спектра зі збільшенням інтервалу аналізу

Якщо збільшувати інтервал аналізу  $T$  до нескінченності, то спектр буде звужуватися і прямувати до дельта-імпульсу. Прямокутний імпульс  $w(t)$  назвемо віконної функцією.

**Швидке перетворення Фур'є сигналу обмеженого в часі. Використання віконного згладжування.** Тепер розглянемо випадок FFT який ставить у відповідність  $N$  відлікам сигналу  $S(n)$ ,  $n = 0, \dots, N-1$ ,  $N$  відділків спектру, узятих на одному періоді повторення спектра:  $S(k)$ ,  $k = 0, \dots, N-1$ . Відліки сигналу, взяті через рівні проміжки часу  $\Delta t = 2\pi/\omega_\sigma$ , де  $\omega_\sigma$  – частота дискретизації (рад/с). Таким чином інтервал аналізу,  $T = N \cdot \Delta t = N \cdot 2\pi/\omega_\sigma$ , тоді спектральні відліки беруться через інтервал  $\Delta\omega = 2\pi/T$ . Ширина головної пелюстки спектру  $S(\omega)$ , (рис. 1) дорівнює  $4\pi/T$ , тоді можна розглянути два випадку. Перший випадок частота сигналу збігається з  $k$ -ою частотою спектра  $\omega_0 = \omega(k)$  (верхній графік рис. 5). При дискретизації отримуємо тільки відлік на частоті  $\omega_0 = \omega(k)$  за амплітудою відповідній амплітуді сигналу, інші спектральні відліки будуть дорівнюють нулю, так як моменти дискретизації спектра співпадають з нулями спектра віконної функції.

Другий випадок коли частота  $\omega_0$  не збігається ні з однією частотою з сітки спектральних відділків (нижній графік рис. 5). В цьому випадку спектр сигналу «розмивається». Замість одного спектрального відділку отримуємо безліч відділків, так як дискретизація проводиться не в нулях спектра функції вікна, і всі бічні пелюстки проявляються в спектрі. Крім того амплітуда спектральних відділків також зменшується.

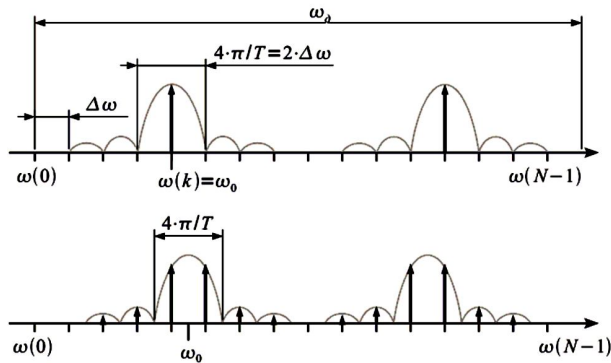


Рис. 5. Швидке перетворення Фур'є при збігу і розбіжності частоти сигналу і сітки частот спектра

Збіг частоти з сіткою спектральних відділків буде в тому випадку якщо на інтервалі обробки укладається ціла кількість періодів сигналу. В іншому випадку спектр «розмаже». Розмазування спектра негативний ефект, з яким необхідно боротися. Покажемо це на прикладі. Нехай є два гармонійних сигналу на частотах  $\omega_0$  і  $\omega_1$ . Причому амплітуда сигналу на частоті  $\omega_1$ , на багато менше амплітуди сигналу на частоті  $\omega_0$ . Обмеження інтервалу аналізу призведе до того, що спектри «розмажуться», і сигнал на частоті  $\omega_1$  буде не помітний під бічною пелюсткою сигналу з частотою  $\omega_0$ , як це показано на рис. 6.

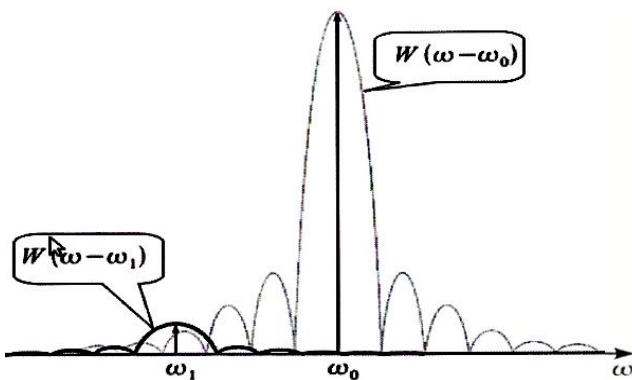


Рис. 6. Сигнал малої амплітуди? не помітний під бічною пелюсткою іншого сигналу

Очевидно, для того щоб виявити слабкий сигнал необхідно усунути бічні пелюстки в спектрі, які виникають коли ми обмежили сигнал прямокутним вікном. Отже, щоб усунути ці пелюстки необхідно усунути їх в спектрі віконної функції  $w(t)$ , тобто треба змінити віконну функцію, а саме зробити її більш гладкою, як це показано на рис. 7.

При гладкій віконній функції в спектрі не спостерігається бічних пелюсток (або їх рівень суттєво

знижується), проте має місце розширення основної пелюстки спектру в порівнянні з прямокутним вікном  $\Omega > 4\pi/T$ . Таким чином ми начебто поборили бічні пелюстки, і змогли виявити слабкі сигнали (рис. 8), які раніше губилися в бічних пелюстках, але заплатили за це розширенням основної пелюстки [11].

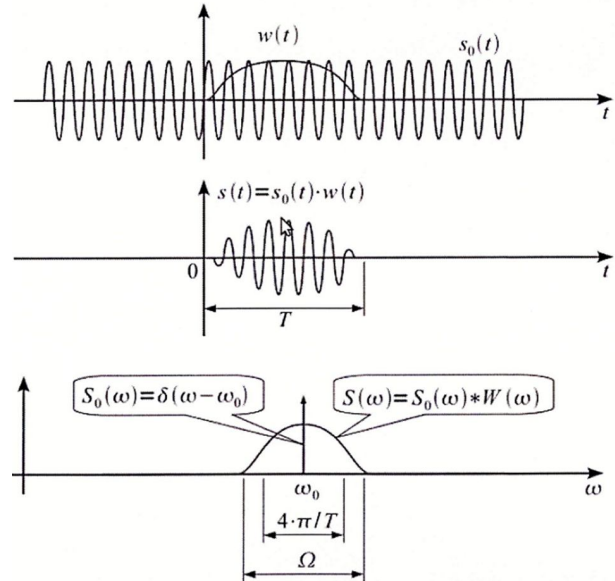


Рис. 7. Гладка вагова функція

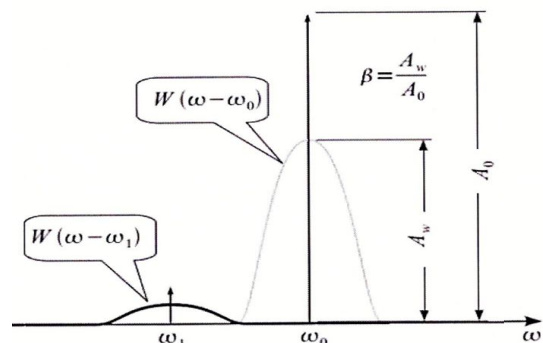


Рис. 8. При гладкій ваговій функції слабкі сигнали не втрачаються в бічних пелюстках

Необхідно відзначити, що чим більше придушення бічних пелюсток спектра віконної функції, тим ширше виходить основна пелюстка. Дане протиріччя призвело до розробки великої кількості віконних функцій з різним придушенням бічних пелюсток і різною шириною головної пелюстки.

**Коефіцієнт ослаблення віконної функції.** Розглянемо ще одну властивість віконної функції, а саме коефіцієнт ослаблення  $\beta$ . Для пояснення коефіцієнта ослаблення  $\beta$  розглянемо постійну складову  $A_w$  віконної функції на інтервалі  $T$ :

$$A_w = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) dt. \quad (2)$$

У разі прямокутного вікна

$$A_{rect} = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T dt = 1. \quad (3)$$

Коефіцієнтом ослаблення  $\beta$  називають відношення постійної складової  $A_w$  заданої функції вікна,

до постійної складової прямокутного вікна  $A_{rect}$ :

$$\beta = \frac{A_w}{A_{rect}} = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) dt. \quad (4)$$

Сенс коефіцієнта ослаблення полягає в тому, що амплітуди всіх спектральних складових після множення на віконну функцію зменшуються в  $\beta$  раз в порівнянні з прямокутним вікном. Коефіцієнт ослаблення записують у вигляді

$$\beta = 20 \cdot \log_{10}(\beta) \text{ дБ}. \quad (5)$$

Якщо у ролі цифрового спектрального аналізу відділки віконної функції взяті через проміжок. Тоді інтеграл у виразі (4) замінюється на суму:

$$\beta = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} w(n) \cdot \Delta t = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} w(n). \quad (6)$$

Для того, щоб врахувати коефіцієнт ослаблення після швидкого перетворення Фур'є необхідно кожен спектральний відділок поділити на  $\beta$  [12].

**Основні частотні характеристики спектра віконної функції.** Узагальнимо основні частотні характеристики спектра віконної функції, що дозволяють порівнювати різні вікна між собою. Для цього розглянемо нормовану амплітудно-частотну характеристику (АЧХ)  $W_H(F_H)$  віконної функції, представлену на рис. 9.

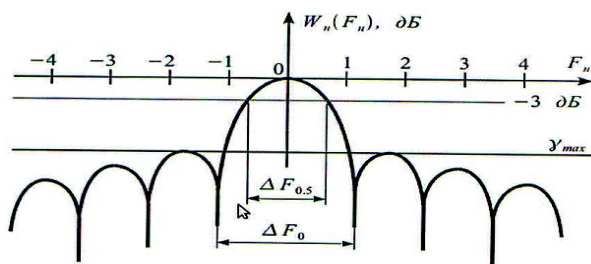


Рис. 9. Нормована АЧХ віконної функції

Нормування амплітуди проводиться для обліку коефіцієнта ослаблення:  $\beta: W_H(\omega) = W(\omega)/\beta$ . Таким чином всі АЧХ матимуть максимум дорівнює одиниці (0 дБ) на нульовій частоті. Оскільки ширина головної пелюстки залежить від тривалості вікна в часі (рис. 4), то введено нормування частоти:

$$F_H = \frac{\omega}{2\pi/T} = \frac{\omega \cdot T}{2\pi}. \quad (7)$$

Таким чином, форма нормованої АЧХ віконної функції не буде змінюватися при зміні тривалості вікна. Тоді можна ввести такі нормовані параметри:

1. Нормована ширина головної пелюстки АЧХ за рівнем 0,5 (-3 дБ)  $\Delta F_{0,5}$  визначається як нормована смуга при якій  $W_H(F_H) > -3$  дБ.

2. Нормована ширина головної пелюстки АЧХ по нульовому рівню  $\Delta F_0$ :  $\Delta F_0 = \Omega \cdot T / (2\pi)$ , рис. 6.

3. Максимальний рівень бічних пелюсток  $\gamma_{max}$ .

Можна помітити, що  $\Delta F_0$  прямокутного вікна дорівнює 2. Тоді можна ввести параметр, що характеризує у скільки раз нормована ширина головної пелюстки АЧХ по нульовому рівню  $\Delta F_0$  заданого вікна ширше ніж  $\Delta F_0$  прямокутного вікна. Позначимо цей параметр як  $K = \Delta F_0 / 2$ . Залежно від параметра  $K$  вікна ділять на вікна з високою роздільною здатністю  $K < 3$  і вікна низького дозволу  $K > 3$ .

Отже, ми зіткнулися з принципом невизначеності для області обробки радіосигналів. Принцип цей носить назву Теорема Бенедик: функція не може бути одночасно обмеженою в діапазоні часу і в діапазоні частоти. І якщо з сигналами нескінченної довжини справу доводиться мати рідко, ця область для практики має менше значення. То з сигналами які мають кінцеву довжину не обійтися без найвідомішої теореми в теорії обробки звукових сигналів – теореми Котельникова-Найквіста-Шеннона, яка в одній з свої інтерпретацій звучить наступним чином: будь-який аналоговий сигнал може бути відновлений з якою завгодно точністю за своїм дискретним відділком тоді, коли значення його відділків  $f > F_{max}$ , де  $F_{max}$  – максимальна частота, якою обмежений спектр вихідного сигналу. Виходячи з цієї теореми і теореми Бенедик ми робимо висновок, що в даний момент реальних сигналів, які можна з нескінченно великою точністю уявити в дискретному і обмеженому вигляді, немає.

З огляду на вищевикладене стає очевидним що вирішити питання створення універсального алгоритму перетворення Фур'є для програмного продукту автоматизованого комплексу пошуку цифрових засобів негласного отримання інформації не представляється можливим. Тобто процес удосконалення алгоритму перетворення Фур'є для ПЗ АПК можливо здійснювати за рахунок різноманітного комбінування віконних функцій для різних радіодіапазонів, для конкретного випадку застосування в ПЗ АПК.

## Висновки

В роботі розглянуто питання обчислення спектру сигналу при спостереженні на обмеженому часовому відрізку. Показано, що обмеження часу аналізу рівносильно використанню прямокутної віконної функції, частотна характеристика якої має максимальні бічні пелюстки. Розроблено механізм зниження рівня бічних пелюсток шляхом згладжування вікном, що в свою чергу, погіршує спектральний аналіз через розширення основної пелюстки, проте значно прискорює процес обробки сигналу для аналізу програмним забезпеченням пошукового комплексу. Крім того, доведено неможливість створення універсального алгоритму пошуку і програмного продукту для автоматизованого комплексу пошуку засобів негласного отримання інформації. Запропоновано шляхи удосконалення швидкого перетворення Фур'є шляхом вірного комбінування віконних функцій для різних радіодіапазонів, для конкретного випадку застосування в програмних засобах апаратно-програмних комплексах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хорев А.А. Защита информации от утечки по техническим каналам. Часть 1. Технические каналы утечки информации: учебное пособие / А.А. Хорев. – М.: Гостехкомиссия России, 1998. – 320 с.
2. Кривцун А.В. Использование новых возможностей комплекса радиомониторинга и цифрового анализа сигналов «Кассандра-М» для обнаружения современных специальных технических средств с передачей информации по радиоканалу [Электронный ресурс] / А.В. Кривцун, А.В. Захаров. – <http://www.inspectorsoft.ru/article.php?id=388>
3. Обзор. Комплексы контроля радиобстановки [Электронный ресурс] режим доступа: <http://www.confident.org.ua/index.php/oborudovanie-dlya-poiska-zhuchkov/91-kompleksy-kontrolya-radiobstanovki.html>.
4. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускнуої здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
5. Коваленко А. А. Подходы к синтезу информационной структуры системы управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // *Системи обробки інформації*. – 2014. – № 1(117). – С. 180-184.
6. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
7. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
8. Musienko A.P., Serdyuk A.S. Lebesgue-type inequalities for the de la Vallée-Poussin sums on sets of analytic functions / A.P. Musienko, A. S. Serdyuk // *Ukrainian Mathematical Journal* September 2013, Volume 65, Issue 4, P. 575 – 592.
9. Быстрое преобразование Фурье [Электронный ресурс] режим доступа :<https://reshbniki-online.ru/node/164118>.
10. Куц Ю.В. Статистична фазометрія. / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. Наукова монографія. – Тернопіль: ВЦ Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, 2009. – 383 с.
11. Musienko A. Information Technology of Targeting: Optimization of Decision Making Process in a Competitive Environment / O. Barabash, G. Shevchenko, N. Dakhno, O. Neshcheret, A. Musienko // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. – Vol. 9. – № 12. – Hong Kong: MECS Publisher, 2017. – P. 1 – 9.
12. Попов В.С. Исследование влияния боковых лепестков спектра окон на погрешности обработки и передачи сигнала <http://windowing-matlab.narod.ru/>

**Рецензент:** д-р техн. наук. проф. І. В. Рубан,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.  
Received (Надійшла) 17.05.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.07.2019

**Методика вибору оптимального вхідного сигналу радіомоніторингу  
для програмних засобів на базі перетворення Фур'є**

А. А. Лаптев, А. П. Мусієнко, В. В. Собчук, Б. Н. Борсук

У статті розглянуто питання обчислення спектра радіосигналу на обмеженому часовому проміжку. Доведено, що обмеження часу аналізу рівносильно використанню прямокутної віконної функції, частотна характеристика якої має максимальні бічні пелюстки. Розроблено механізм зниження рівня бічних пелюсток шляхом згладжування віконною функцією, що у свою чергу, погіршує спектральний аналіз через розширення величини основного сигналу. Проте значно прискорює процес обробки сигналу для аналізу оператором пошукового комплексу. Використання віконних функцій в програмних продуктах пошукових комплексів значно підвищує ймовірність виявлення цифрових засобів негласного отримання інформації. Доведено неможливість створення універсального алгоритму перетворення аналогового сигналу у цифровий який би міг бути безпомилковим вхідним сигналом для створення програмного засобу автоматизованого комплексу пошуку засобів негласного отримання інформації. Розроблена методика підвищення якості використання швидкого перетворення Фур'є для апаратно програмних комплексів радіомоніторингу. Суть цієї методики у комбінованому підході до перетворення, тобто використовувати не одну віконну функцію, а більш доцільні використовувати віконні функції для кожного відрізка частотного діапазону.

**Ключові слова:** методика, радіомоніторинг, швидке перетворення Фур'є, спектр, віконні функції.

**Methodic for the selection of optimal incoming radio monitoring signal  
for software under Fourier-transformation**

A. Musienko, A. Laptev, V. Sobchuk, B. Borsuk

The article deals with the question of calculating the spectrum of a radio signal on a limited time interval. It is proved that the time limitation of the analysis is equivalent to the use of a rectangular window function whose frequency characteristic has maximum lateral petals. The mechanism of decreasing the level of side lobes by smoothing the window function is developed, which, in turn, worsens the spectral analysis due to the expansion of the value of the main signal. However, the signal processing process is significantly accelerated for analysis by the operator of the search engine. The use of window functions in software products of search engines greatly increases the likelihood of the discovery of digital means of secret access to information. The impossibility of creating a universal algorithm for transforming an analog signal into a digital one, which could be an error-free input signal, was created to create a software tool for an automated search system for tacit reception of information. The method of improving the quality of the use of the Fourier transform for the hardware of software complexes of radio monitoring is developed. The essence of this technique in the combined approach to the transformation, that is, to use not one window function, but more appropriate to use the window functions for each segment of the frequency range.

**Keywords:** methodology, radio monitoring, fast Fourier transform, spectrum, window functions.

В. М. Почерняєв<sup>1</sup>, В. В. Зайченко<sup>2</sup><sup>1</sup> Одеська національна академія зв'язку імені О. С. Попова, Одеса, Україна<sup>2</sup> Київський коледж зв'язку, Київ, Україна

## БОРОТЬБА З МІЖСИМВОЛЬНОЮ ІНТЕРФЕРЕНЦІЄЮ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕКВАЛАЙЗЕРІВ І ОРТОГОНАЛЬНОГО ЧАСОВОГО МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ

В даній статті досліджується два варіанти боротьби з міжсимвольною інтерференцією (МСІ) в багатопробному каналі зв'язку: застосування еквалайзерів і ортогонального часового мультиплексування. Метою статті є порівняння застосування еквалайзерів і ортогонального часового мультиплексування, як способів боротьби з МСІ по їх енергетичній ефективності. Розглянуто схеми побудови адаптивних еквалайзерів і застосування каналного прекодера для реалізації ортогонального часового мультиплексування. В роботі показано, що при реалізації радіотехнічних систем, що працюють по каналах з МСІ вибір способу боротьби може визначитися розробником залежно від вимог, що пред'являються до такої системи. У каналах зі змінними параметрами, а таким є канал тропосферного зв'язку, адаптивні еквалайзери зі зворотнім зв'язком за рішенням можуть виявитися у боротьбі з МСІ краще ОТДМ-системи. Результати даної роботи можна використовувати при розробці мобільних цифрових тропосферних станцій спеціального призначення та комбінованих мобільних цифрових тропосферно-радіорелейних станцій.

**Ключові слова:** адаптивний еквалайзер, ортогональне часове мультиплексування (ОТДМ), міжсимвольна інтерференція, багатопробне поширення радіохвиль, тропосферний канал зв'язку, мобільна цифрова тропосферна станція.

### Вступ

**Постановка завдання.** Мобільні цифрові тропосферні станції знаходять застосування: при техногенних катастрофах, стихійних лихах, позаштатних ситуаціях, що виникають на мережі зв'язку, у важкодоступній місцевості або для зв'язку через великі водні перешкоди, а також при вирішенні ряду спеціальних або відомчих завдань встановлення зв'язку. При цьому інформація передається по тропосферних каналах зв'язку. Тропосферний канал зв'язку характеризується багатопробним поширенням радіохвиль.

Багатопробне поширення радіохвиль призводить до виникнення міжсимвольної інтерференції (МСІ). Тому реалізація одного із способів боротьби з МСІ в мобільних цифрових тропосферних станціях є актуальним завданням.

**Аналіз літературних джерел.** В даний час існує декілька способів боротьби з багатопробністю, які на наш погляд найбільш повно відображені в роботах [1, 2]. Як правило, в багатопробних каналах використовується PSK-модуляція і складні методи кодування [7-10]. У мобільних цифрових тропосферних станціях застосовується PSK-модуляція [11, 12]. Серед різних способів боротьби з МСІ визначається застосування еквалайзерів [13-17]. У багатопробних каналах зв'язку застосовуються такі способи боротьби з МСІ як ортогональне мультиплексування, рознесений прийом, перешкодостійкі алгоритми обробки інформації [18-30]. Реалізація деяких варіантів боротьби з замираннями і з МСІ для операторів зв'язку викладені в роботах [3, 4]. Однак ці результати можуть бути застосовані і до тропосферних каналів зв'язку.

**Невирішені питання.** Наявність різних способів боротьби з МСІ іноді ускладнює розробників у виборі відповідного способу реалізації для конкретної радіотехнічної системи з причини відсутності порівняльних характеристик. Це пояснюється тим,

що вимоги технічного завдання на розробку радіотехнічної системи, як правило, містять ряд суперечливих положень. У роботах [31-33] зроблена спроба порівняти ефективність різних способів боротьби з МСІ. Однак, ці дані мають прогалину щодо порівняння методу застосування еквалайзерів з ортогональним мультиплексуванням з точки зору їх енергетичної ефективності.

**Мета дослідження.** Метою статті є порівняння застосування еквалайзерів і ортогонального часового мультиплексування, як способів боротьби з МСІ по їх енергетичній ефективності.

### Основна частина

Один з відомих способів боротьби з МСІ ґрунтується на застосуванні еквалайзерів, які вирівнюють частотну характеристику (ЧХ) каналу. Слід зазначити, що оцінка стану каналу здійснюється тільки на приймальній стороні. Якщо оцінювати канал на передавальній і приймальній сторонах, то для цього необхідний канал зворотного зв'язку. У цьому випадку необхідна наявність каналного прекодера, який частково спотворює сигнал так, щоб після проходження через канал зв'язку сигнал брав потрібну форму і не виникала МСІ. Такий метод отримав назву ортогональне часове мультиплексування (ОТДМ - Orthogonal Time Division Multiplexing).

Можливий варіант побудови адаптивного еквалайзера представлений на рис. 1.

Еквалайзер реалізує ЧХ виду:

$$S_{\text{екв}}(\xi) = \sum_{n=0}^{N-1} \rho_n \exp(-j\xi nT), \quad (1)$$

де  $\xi$  – узагальнена частота сигналу.

При знаходженні вагових коефіцієнтів  $\rho_n$  у (1) часто використовується критерій мінімуму середньоквадратичного відхилення (СКВ) у відлікових точках між відомим тестовим сигналом і сигналом на виході еквалайзера. Реалізація еквалайзера заснована на методі найменших квадратів.

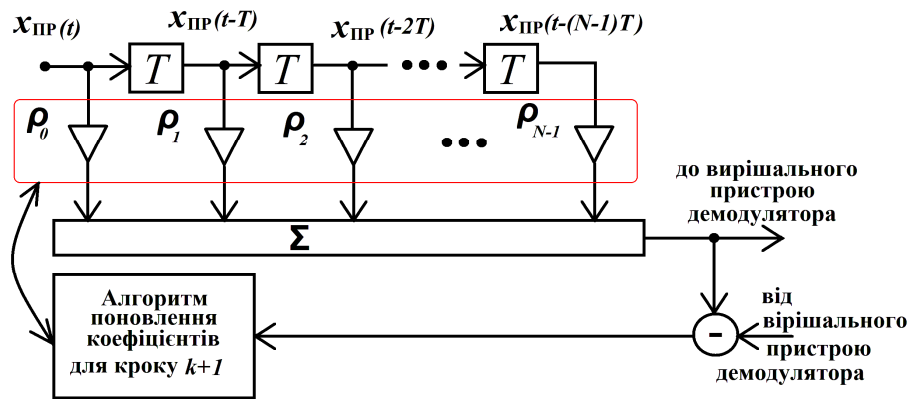


Рис. 1. Схема адаптивного еквалайзера

При цьому мінімізація суми квадратів помилок досягається вибором вагових коефіцієнтів  $\rho_n$ , одержуваних в результаті рішення системи лінійних рівнянь.

Застосування ітеративного алгоритму пошуку мінімуму СКВ не вимагає рішення системи рівнянь. Більш складним в реалізації алгоритмом визначення вагових коефіцієнтів еквалайзера є рекурсивний алгоритм, який має, однак більш високу швидкість збіжності до вирішення.

В адаптивних еквалайзерах може використовуватися як ітеративний алгоритм, так і рекурсивний алгоритм найменших квадратів.

Зауважимо, що в розглянутому адаптивному еквалайзері попереднє рішення використовується

для підстроювання вагових коефіцієнтів  $\rho_n$ , при наступному  $(k+1)$ - кроці прийняття рішення в демодуляторі. При цьому алгоритм обробки вхідного сигналу залишається таким, як і в лінійному трансверсальному еквалайзері. Крім лінійних еквалайзерів застосування знайшли також складніші еквалайзери зі зворотним зв'язком за рішенням. У цих еквалайзерах знання попередніх рішень використовується для усунення МСІ шляхом вирахування післядії від попередніх переданих сигналів з вихідного сигналу еквалайзера перед прийняттям чергового рішення про переданий символ (рис. 2). Такий еквалайзер містить «пряму гілку», а формування зазначеної післядії проводиться за допомогою пристрою у «зворотній гілці», як показано на рис. 2.

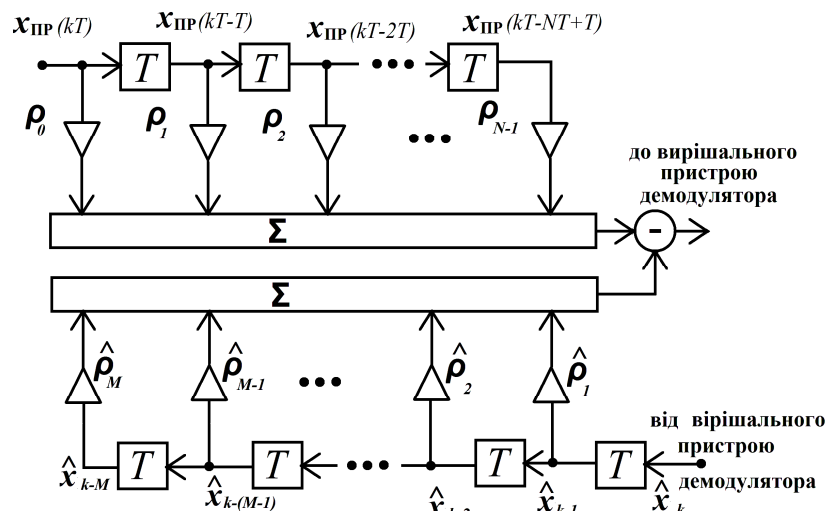


Рис. 2. Схема адаптивного еквалайзера з «прямою гілкою» і «зворотною гілкою»

На рис. 3 приведена структурна схема ОТДМ-системи з каналним прекодером. Прекодер на основі поточних оцінок імпульсної характеристики (ІХ) каналу  $h(t-nT)$ , отриманих від приймача по зворотному каналу, формує послідовність частково спотворених імпульсів  $p(t-nT)$ , узгоджених з параметрами каналу. Послідовність імпульсів каналу  $q(t-nT)$  розраховується каналним прекодером в якості опорних сигналів. У ОТДМ-системі використовується критерій мінімізації середньоквадратичного відхилення (СКВ) сигнального імпульсу на виході каналу від тестового, за рахунок чого вдається

компенсувати не тільки глибокі завмирання, але і більш глибокі частотно-селективні завмирання.

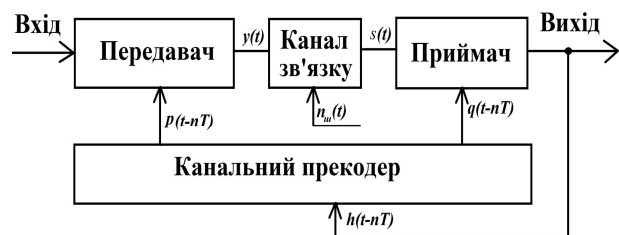


Рис. 3. Структурна схема ОТДМ-системи з каналним прекодером

У OTDM-системі здійснюється згортка сигналів:

$$q(t-nT) = h(t-nT) * p(t-nT) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\zeta)h(t-\zeta)d\zeta, \quad (2)$$

де \* - знак згортки,  $q(t-nT)$  - сигнал, найбільш близький до тестового сигналу за критерієм мінімуму СКВ після проходження через канал зв'язку сигналу  $p(t-nT)$ .

Для схеми на рис. 3 маємо:

$$s(t) = h(t-nT)y(t) + n_{ш}(t),$$

де  $n_{ш}(t)$  - адитивний білий шум.

Формуванням каналним прекодером сигналу, що описується функцією  $f(\zeta)$ , забезпечується адаптація приймально-передавального тракту під поточні параметри каналу. Для цього сигнал  $p(t-nT)$  частково спотворюється так, щоб після проходження через канал з глибокими завмираннями і адитивним білим шумом перетворитися в сигнал  $q(t-nT)$  близький до тестового. В якості тестового сигналу може бути обраний імпульс типу «припіднятий косинус» [2], що має максимум в центрі інтервалу  $[0, T]$  і симетричний щодо центру. Функція  $f(\zeta)$  у (2) може бути представлена у вигляді ряду:

$$f(\zeta) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k\Delta) \frac{\sin[(\pi/\Delta)(\zeta-k\Delta)]}{(\pi/\Delta)(\zeta-k\Delta)}, \quad (3)$$

де  $\Delta$  - узагальнена полоса частот.

Для того щоб обчислити інтеграл (2) необхідно внести вираз (3) під знак інтегралу. Здійснити коректну перестановку знаку інтегралу і суми можна в тому випадку, якщо показати, що ряд (3) рівномірно сходиться [5]. Для цього використовуємо контурний інтеграл вигляду:

$$\frac{1}{2\pi j} \int_C \frac{f(\zeta)}{(\sin(\pi/\Delta)\zeta)(k\Delta-\zeta)} d\zeta, \quad (4)$$

де  $C$  - окружність радіуса  $(k+1/2)\Delta$  з центром на початку координат.

Інтегрування (4) здійснюється за методом віднімань [6]. Якщо точка  $\zeta$  не співпадає з точками

$k\Delta$ , то віднімання в цій точці дорівнює  $\frac{f(\zeta)}{\sin(\pi/\Delta)\zeta}$ .

Віднімання в точках  $k\Delta$  при співпаданні дорівнює

$$f(k\Delta)/((\pi/\Delta) \cdot (k\Delta-\zeta) \cos k\pi).$$

Тоді маємо:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\pi j} \int_C \frac{f(\zeta)}{(\sin(\pi/\Delta)\zeta)(k\Delta-\zeta)} d\zeta = \\ & = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{f(k\Delta)}{(\pi/\Delta)(k\Delta-\zeta) \cos k\pi} + \frac{f(\zeta)}{\sin(\pi/\Delta)\zeta}. \end{aligned} \quad (5)$$

Ліва частина виразу (5) прагне до нуля рівномірно в колі радіусом  $(k+1/2)\Delta$ . Це означає, що ряд

стоїть в правій частині виразу (5) також сходиться рівномірно у будь-якій кінцевій частині площини кола і має місце співвідношення:

$$\frac{f(\zeta)}{\sin(\pi/\Delta)\zeta} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{f(k\Delta)}{(\pi/\Delta)(\zeta-k\Delta) \cos k\pi}. \quad (6)$$

Маючи додавання від  $-\infty$  до  $+\infty$ , враховуючи  $\cos k\pi = \pm 1$  і що

$$\sin(\pi/\Delta)\zeta \cdot \cos k\pi = \sin(\pi/\Delta) \cdot (\zeta-k\Delta),$$

після перетворення виразу (6), отримуємо вираз (3).

Слід враховувати, що серед попередніх рішень, які використовуються в еквалайзерах, можуть бути і помилкові.

Однак еквалайзери, що розглядаються застосовуються в умовах, коли переважаючою перешкодою є саме МСІ, так що ймовірність помилкових рішень, пов'язаних з адитивним шумом в каналі, виявляється незначною. Використання розглянутих еквалайзерів дозволяє знизити рівень МСІ у відлікових точках, але не забезпечує можливого мінімуму значень ймовірності помилкового прийому в умовах сумісної дії МСІ і адитивного шуму. Мінімізація значень ймовірності помилкового прийому може бути досягнута застосуванням методів демодуляції, що використовують алгоритм Вітербі [1].

При OTDM алгоритм цифрового прийому зводиться до посимвольної обробки сигналів, що спрощує реалізацію демодуляторів. Однак, в цьому випадку OTDM-система програє по енергетичній ефективності системі, яка здійснює прийом «в цілому» за алгоритмом Вітербі.

Енергетичну ефективність застосування еквалайзерів і OTDM-системи визначимо по залежності ймовірності помилкового прийому від співвідношення сигнал/шум.

Моделювання здійснимо на основі використання ітеративного алгоритму в п'яти відлікових точках.

Для модуляції BPSK ймовірність помилкового прийому  $p_{пот}$  визначається як:

$$p_{пот} = Q(\sqrt{2}h),$$

$$Q(\sqrt{2}h) = (1 - \Phi(\sqrt{2}h)) / 2,$$

де  $\Phi(\sqrt{2}h)$  - функція Крампа,  $h^2 = c/\text{ш}$ .

На рис. 4 показані залежності ймовірності помилкового прийому від співвідношення сигнал/шум для модуляції BPSK. На рис. 4 крива 1 в каналі з МСІ - для лінійного трансверсального еквалайзера [1]; крива 2 в каналі з МСІ - для OTDM-системи (рис.3); крива 3 в каналі з МСІ - для адаптивного еквалайзера за схемою рис. 1; крива 4 в каналі з МСІ - для адаптивного еквалайзера за схемою рис. 2; крива 5 - в каналі без МСІ [1].

З графіків на рис. 4 видно, що OTDM-система програє по енергетичній ефективності адаптивним еквалайзерам, але є більш кращою з цієї точки зору в порівнянні з застосуванням лінійних трансферсальних еквалайзерів.

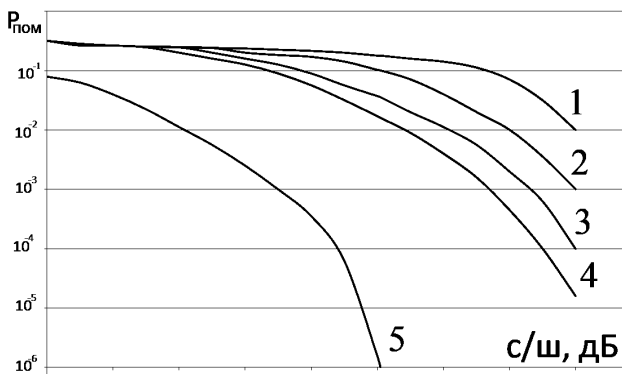


Рис. 4. Залежності ймовірності помилкового прийому від відношення сигнал/шум

## Висновки

В роботі показано, що при реалізації радіотехнічних систем, що працюють по каналах з МСІ вибір способу боротьби може визначатися розробником залежно від вимог, що пред'являються до такої системи. У каналах зі змінними параметрами, а таким є канал тропосферного зв'язку, адаптивні еквалайзери зі зворотнім зв'язком за рішенням можуть виявитися у боротьбі з МСІ краще ОТДМ-системи.

Перспективи подальших досліджень полягають у поширенні даного результату на більш складні види модуляції, перш за все m-PSK, і порівнянні застосування еквалайзерів з іншими видами ортогонального мультиплексування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Варгаузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. — 352 с.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
3. Почерняев В.Н. Борьба с замираниями сигнала в мобильных системах связи // Зв'язок, 2004. - №7. – С.34-36.
4. Почерняев В.Н. Борьба с межсимвольной интерференцией в мобильных системах связи// Зв'язок, 2006. - №4. – С. 18-20.
5. Фихтенгольд Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – М.: Наука, 1969. – т.1 – 607с., т.2 – 800с., т.3 – 656с.
6. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1967. – 778с.
7. Khairullin M.I., Lerner I.M., Faizullin R.R., Kadushkin V.V., Fatykhov M.M. (2017) Selection of the initial shift for PSK signal constellation in the presence of intersymbol interference. IEEE Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO).
8. Lerner I.M., Il'in G.I., Chernyavskii S. M. Capacity estimation of communication channel with PSK-n-signals in the presence of intersymbol interference. (2017) IEEE Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO), p.p. 1-7.
9. Polar code design for intersymbol interference channels Ubaid U. Fayyaz; John R. Barry 2014 IEEE Global Communications Conference, p.p. 2357 – 2362.
10. Laroia R. Coding for intersymbol interference channels-combined coding and precoding. (1994) Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Information Theory, p.p. 328.
11. Troposcatter Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.raytheon.com/capabilities/products/troposcatter/>.
12. Troposcatter Hardware [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.comtechsystems.com/products-systems/troposcatter-hardware/>.
13. Zhongqiu He, Rui Qian. An MMSE-EIC equalization for FBMC/OQAM systems. (2017) Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL), p.p. 1021 – 1025.
14. Kuo Zhang, Qunbi Zhuge, Haiyun Xin, Mohamed Morsy-Osman, Eslam El-Fiky, Lilin Yi, Weisheng Hu, Plant David V. Intensity-directed Equalizer for Chirp Compensation Enabling DML-based 56Gb/s PAM4 C-band Delivery over 35.9km SSMF. (2017) European Conference on Optical Communication (ECOC), p.p. 1 – 3.
15. Martin Fritz, Rana Ahmed, Ben Eitel. Enhanced single carrier iterative interference cancellation frequency domain equalization. (2016) IEEE International Conference on Communications (ICC), p.p. 1 – 6.
16. Xiaoya Zuo, Ding Wang. Interference cancelation for non-CP DS-UWB system with MRC frequency domain equalization. (2015) Proceedings of the 2015 Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT), p.p.1 – 4.
17. Muhammet Fatih Bayramoglu, Markku Juntti. A multirate equalizer for inter-symbol interference channels based on successive interference cancellation. (2013) IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), p.p. 1472 – 1477.
18. Srilatha M., Hemalatha R., K.S. Ramesh. An Improved Technique to Mitigate Interference between Adjacent Bands in Cognitive Radio System. (2017) IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC), p.p. 292 – 296.
19. Christoffer Fougstedt, Lars Svensson, Mikael Mazur, Magnus Karlsson, Per Larsson-Edefors. Finite-Precision Optimization of Time-Domain Digital Back Propagation by Inter-Symbol Interference Minimization. (2017) European Conference on Optical Communication (ECOC), p.p.1 – 3.
20. Sha Hu, Fredrik Rusek. Channel shortening algorithms for multiple intersymbol interference channels. (2016) IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), p.p. 1 – 7.
21. Rory Gowen, Brian Daku, David Dodds. Optimizing a matched filter in the presence of ISI and adjacent channel interference. (2013) 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), p.p. 1 – 4.
22. Bingchao Liu, Li Fang, Daoben Li. Transmit Diversity Design for Channels with Inter Symbol Interference. (2013) IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), p.p. 1 – 5.
23. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>



24. Amin Salih M. and Potrus M.Y. (2015), "A Method for Compensation of Tcp Throughput Degrading During Movement Of Mobile Node", ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences, Vol. 27, No 6, pp. 59–68.
25. Amin Salih Mohammed, Saravana Balaji B., Hiwa Abdulkarim Mawlood. Conceptual analysis of Iris Recognition Systems. Advanced Information Systems. 2019. Vol. 3, No. 2. P. 86-90. DOI : <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.15>
26. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
27. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. Studies in Systems, Decision and Control, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
28. Кучук Г. А. Метод параметричного управління передачею даних для модифікації транспортних протоколів безпроводних мереж / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
29. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.
30. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209–213.
31. Allred Richard J. Barry Katz, Cynthia Furse. Ripple analysis: Identify and quantify reflective interference through ISI decomposition. (2016) IEEE 20th Workshop on Signal and Power Integrity (SPI), p.p. 1 – 4.
32. Varin A. P. The method of intersymbol interference elimination in slowly changing multipath channels. (2014) 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology, p.p. 387 – 388.
33. Giorgio Taricco, Boutros Joseph J. An asymptotic approximation of the ISI channel capacity. (2014) Information Theory and Applications Workshop (ITA), p.p. 1 – 5.

Рецензент: д-р техн. наук. проф. Н. І. Кунах,  
Київський коледж зв'язку, Київ.

Received (Надійшла) 30.07.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.08.2019

#### **Борьба с межсимвольной интерференцией с помощью эквалайзеров и ортогонального временного мультиплексирования**

В. Н. Почерняев, В. В. Зайченко

В данной статье исследуется два варианта борьбы с межсимвольной интерференцией в многолучевом канале связи: применение эквалайзеров и ортогональное временное мультиплексирование (ОТДМ). Целью статьи является сравнение применения эквалайзеров и ортогонального временного мультиплексирования, как способов борьбы с МСИ по их энергетической эффективности. Рассмотрены схемы построения адаптивных эквалайзеров и применение канального прекодера для реализации ортогонального временного мультиплексирования. Рассмотрены схемы построения адаптивных эквалайзеров и применение канального прекодера для реализации ортогонального временного мультиплексирования. В работе показано, что при реализации радиотехнических систем, работающих по каналам с МСИ выбор способа борьбы может определяться разработчиком в зависимости от требований, предъявляемых к такой системе. В каналах с переменными параметрами, а таков канал тропосферной связи, адаптивные эквалайзеры с обратной связью по решению могут оказаться в борьбе с МСИ лучше ОТДМ-системы. Результаты данной работы можно использовать при разработке мобильных цифровых тропосферных станций специального назначения и комбинированных мобильных цифровых тропосферно-радиорелейных станций.

**Ключевые слова:** адаптивный эквалайзер, ортогональное временное мультиплексирование (ОТДМ), межсимвольная интерференция, многолучевое распространение радиоволн, тропосферный канал связи, мобильная цифровая тропосферная станция.

#### **Struggle against intersymbol interference by using equalizers and orthogonal time-division multiplexing**

V. Pochernyaev, V. Zaichenko

Multipath propagation of radio waves leads to the occurrence of intersymbol interference (MSI). Therefore, the implementation of one of the ways to combat ISI in mobile digital troposcatter stations is an urgent task. In this article explores two options for dealing with intersymbol interference in a multipath communication channel: the use of equalizers and orthogonal time division multiplexing (OTDM). One of the known ways to combat ISI is based on the use of equalizers that equalize the frequency response of the channel. It should be noted that the channel condition assessment is carried out only on the receiving side. If evaluate the channel on the transmitting and receiving sides, then this requires a feedback channel. In this case, it is necessary to have a channel precoder that predistorts the signal so that after passing through the communication channel the signal takes the desired shape and there is no MSI. The designs of adaptive equalizers and the application of channel precoder for implementing orthogonal time multiplexing are considered. With OTDM, the digital reception algorithm is reduced to character-by-character processing of received signals, which simplifies the implementation of demodulators. However, in this case, the OTDM system loses in energy efficiency to a system that implements reception "in general" according to the Viterbi algorithm, but is more preferable from this point of view in comparison with the use of linear transverse equalizers. It is shown in the work that when implementing radio systems operating on channels with ISI, the choice of the control method can be determined by the developer depending on the requirements for such a system. In channels with variable parameters, and such is the troposcatter communication channel, adaptive equalizers with feedback by decision may turn out to be preferable to the OTDM system in the fight against ISI. The results of this work can be used in the development of mobile digital troposcatter stations for special purposes and combined mobile digital troposcatter-radiorelay stations.

**Keywords:** intersymbol interference, adaptive equalizer, orthogonal time-division multiplexing (OTDM), multipath propagation of radio waves, troposcatter communication channel, mobile digital troposcatter station.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Альошин С. П.	40	Карлов А. Д.	130	Певнев В. Я.	100
Артеменко А. М.	130	Карлов В. Д.	130	Пивоварова Д. І.	28
Багрій М. М.	118	Кірвас В. В.	114	Пономаренко Р. П.	43
Базилевський І. С.	21	Ковалевський С. М.	9	Почерняєв В. М.	141
Бакуменко Б. В.	9	Кононов В. Б.	13	Пустовіт М. О.	95
Барковська О. Ю.	28	Кононова О. А.	13	Рубан І. В.	72
Бородіна О. О.	40	Король О. Г.	82	Сердечний В. С.	28
Борозенець І. О.	3	Коцюба В. П.	126	Собчук В. В.	135
Борсук Б. М.	135	Кузнецов О. Л.	130	Соломіна Н. В.	13
Босько В. В.	110	Кучук Н. Г.	53	Стадник В. В.	49
Васиденко Д. В.	21	Лада Н. В.	95	Тахьян К. А.	9
Василишин В. І.	126	Лаптев О. А.	135	Тихенко О. М.	122
Волобуєв Р. В.	21	Лебеденко Т. М.	57	Ткаченко М. Д.	21
Гаврилишин А. А.	35	Лемешко О. В.	63	Федоров А. В.	9
Гадецька С. В.	43	Лещинська І. О.	105	Федотова-Півень І. М.	95
Гафійак А. М.	40	Лещинський В. О.	105	Хайлан А. М.	63
Глива В. А.	122	Леві Л. І.	17	Харченко В. С.	100
Головешко М. В.	57	Луняка В. Д.	126	Хвостенко В. С.	82
Гороховатський В. О.	43	Ляшова А. О.	28	Ходаковський О. В.	122
Данілов Ю. О.	49	Маковейчук О. М.	72	Холодкова А. В.	57
Деркач Т. Н.	35	Макогон О. А.	21	Худов Г. В.	9, 72
Дмитренко А. А.	35	Мелешко Є. В.	110	Чалий С. Ф.	105
Дмитренко Т. А.	35	Мілов О. В.	82	Шаповалова А. С.	63
Дмітрієв О. М.	3	Морозова О. І.	87	Шефер О. В.	40
Євдокименко М. О.	63	Мусієнко А. П.	135	Шило С. Г.	3
Єременко О. С.	63	Онопрієнко О. С.	21	Шингалов Д. В.	110
Зайченко В. В.	141	Павленко М. А.	3	Шитова Т. М.	114
Зубрицький Г. М.	114	Паценко О. М.	91		
Канашевич Г. В.	95	Петрушенко М. М.	3		

Наукове видання

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 4 (56)

Відповідальна за випуск *К. С. Козелкова*Технічний редактор *Т. В. Уварова*Коректор *О. В. Морозова*Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*Оформлення обкладинки *І. В. Львіна*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.

Підписано до друку 12.09.2019. Формат 60×84/8. Ум.-друк арк. 18,25. Тираж 150 прим. Зам. 911-19

Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (066) 706-18-30

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Віддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.  
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.  
Запис № 2480000000106167 від 08.01.2009.61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34  
e-mail: [bookfabrik@mail.ua](mailto:bookfabrik@mail.ua)